INFORMATION et FORMATION en RADIOPROTECTION

<u>But</u> : donner aperçu notions de radioactivité ⇨ radio-protection aux personnes susceptibles d'être exposées aux rayonnements ionisants

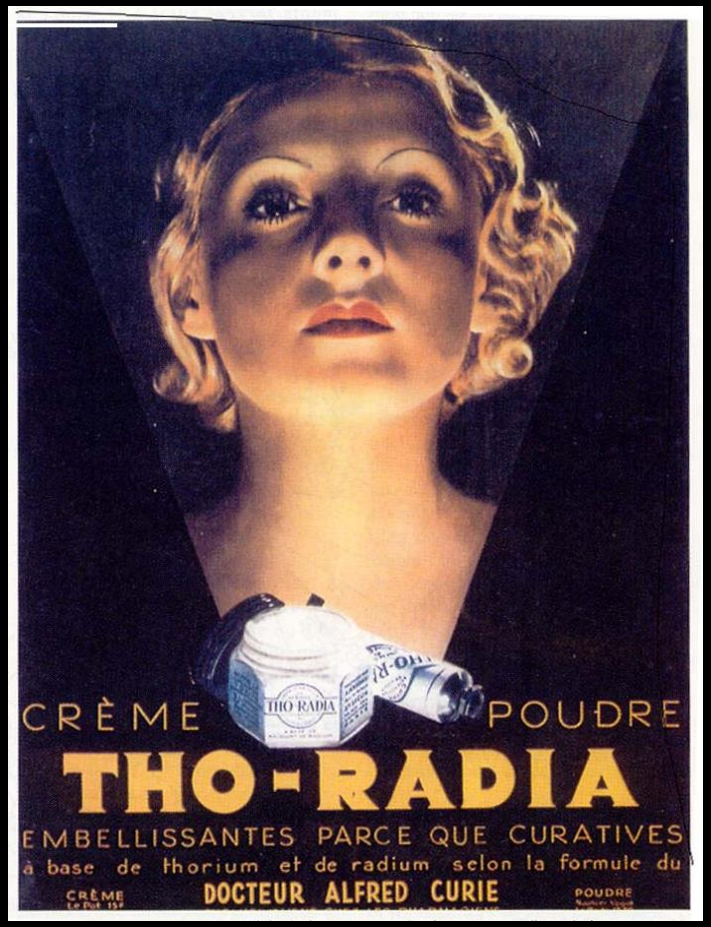
<u>Législation</u> : Arrêté Royal juillet 2001

Mons, septembre 2006

Sommaire

- Radioactivité
- Rayonnements (radiations) ionisants
  - Interaction avec matière
  - Effets biologiques
- Irradiation – contamination
- Définition des unités de doses
- Radio-protection
  - Limites de doses
  - Protection contre l'irradiation - contamination

1. La radioactivité



Produit de beauté au thorium commercialisé dans les années 1920

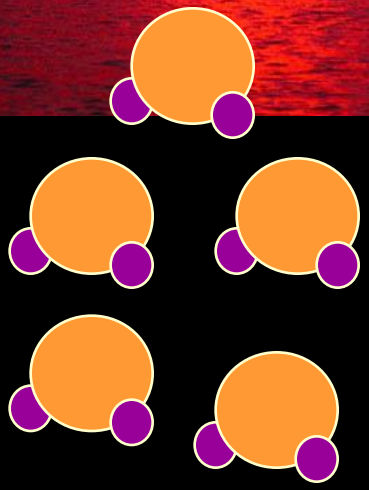
La radioactivité : ?

naturelle &

artificielle

La matière

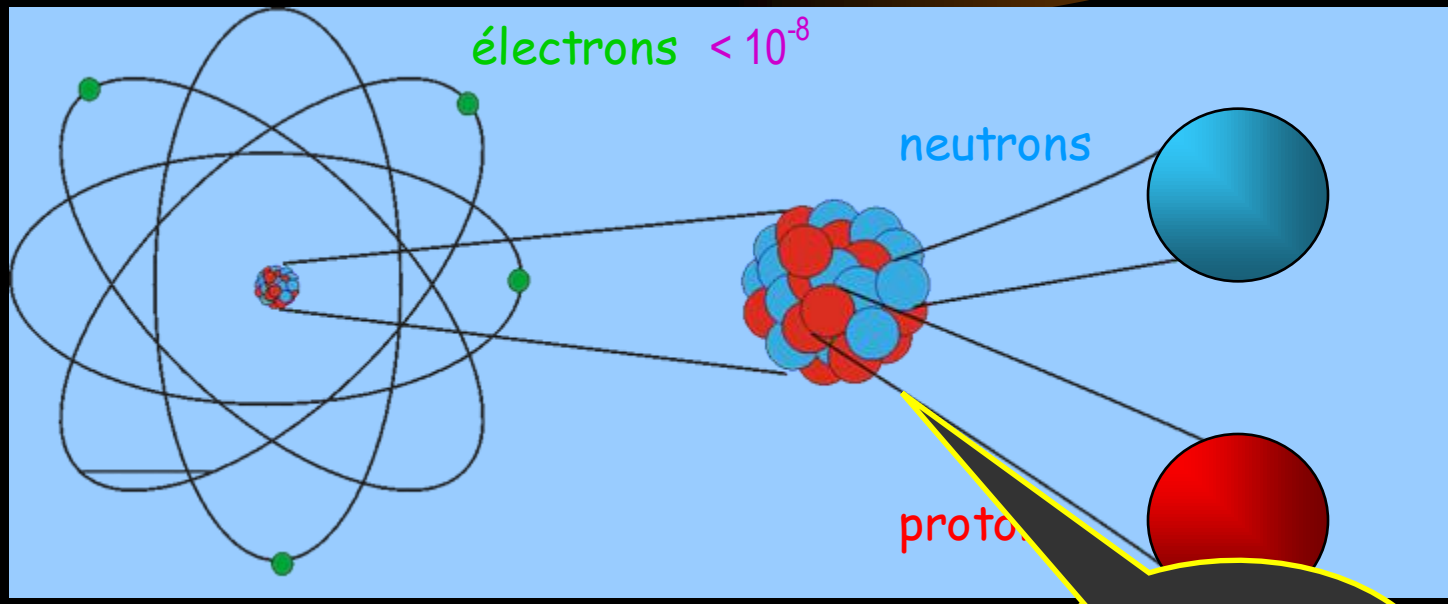
Les molécules



H_2O

L'atome

1



noyau

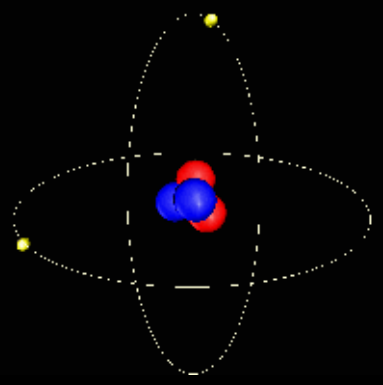
10^{-4}

nucléons

10^{-5}

Physique nucléaire

Le noyau de l'atome



Nombre de masse
nucléons : p + n

Nombre atomique
protons (ou e^-)

$^{A}_{Z}X$

élément

$N = A - Z$

neutrons

$Z = 1$ ⇨ H hydrogène

$Z = 6$ ⇨ C carbone

$Z = 92$ ⇨ U uranium

Les isotopes

isos (égal) - *topos* (lieu)

$Z =$ A $\neq$

$^{1}_{1}H$ $^{2}_{1}H$ $^{3}_{1}H$ (99,9%, 0,01%, traces)

Hydrogène, deutérium, tritium

Z=1

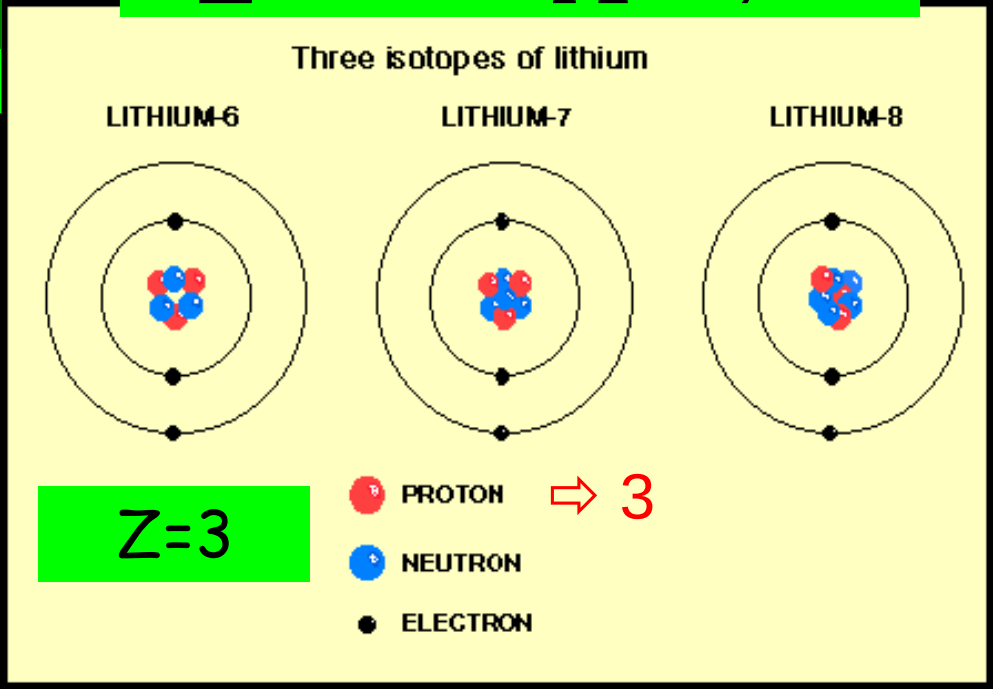
^{12}C ^{14}C datation

Z=6

Uranium
isotopes radioactifs

^{234}U (99,275 %)
^{235}U (0,720 %)
^{238}U (0,005 %)

Z=92



Z=3

⇨ 3

Les radio-isotopes

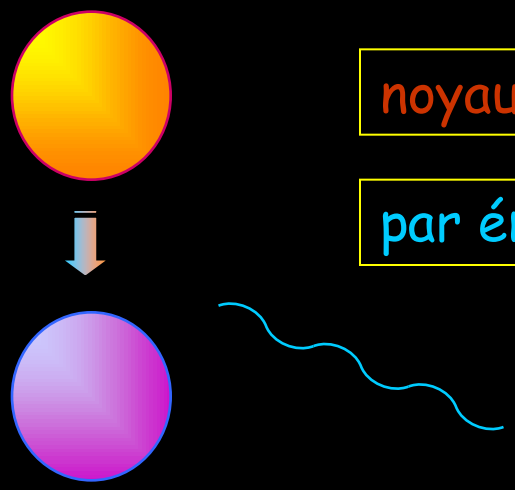
$^{1}_{1}H$ $^{2}_{1}H$ $^{3}_{1}H$

Hydrogène, deutérium, tritium

$$^{3}_{1}H \rightarrow ^{3}_{2}He + \beta^{-}$$

Isotopes stables

Radio-isotopes

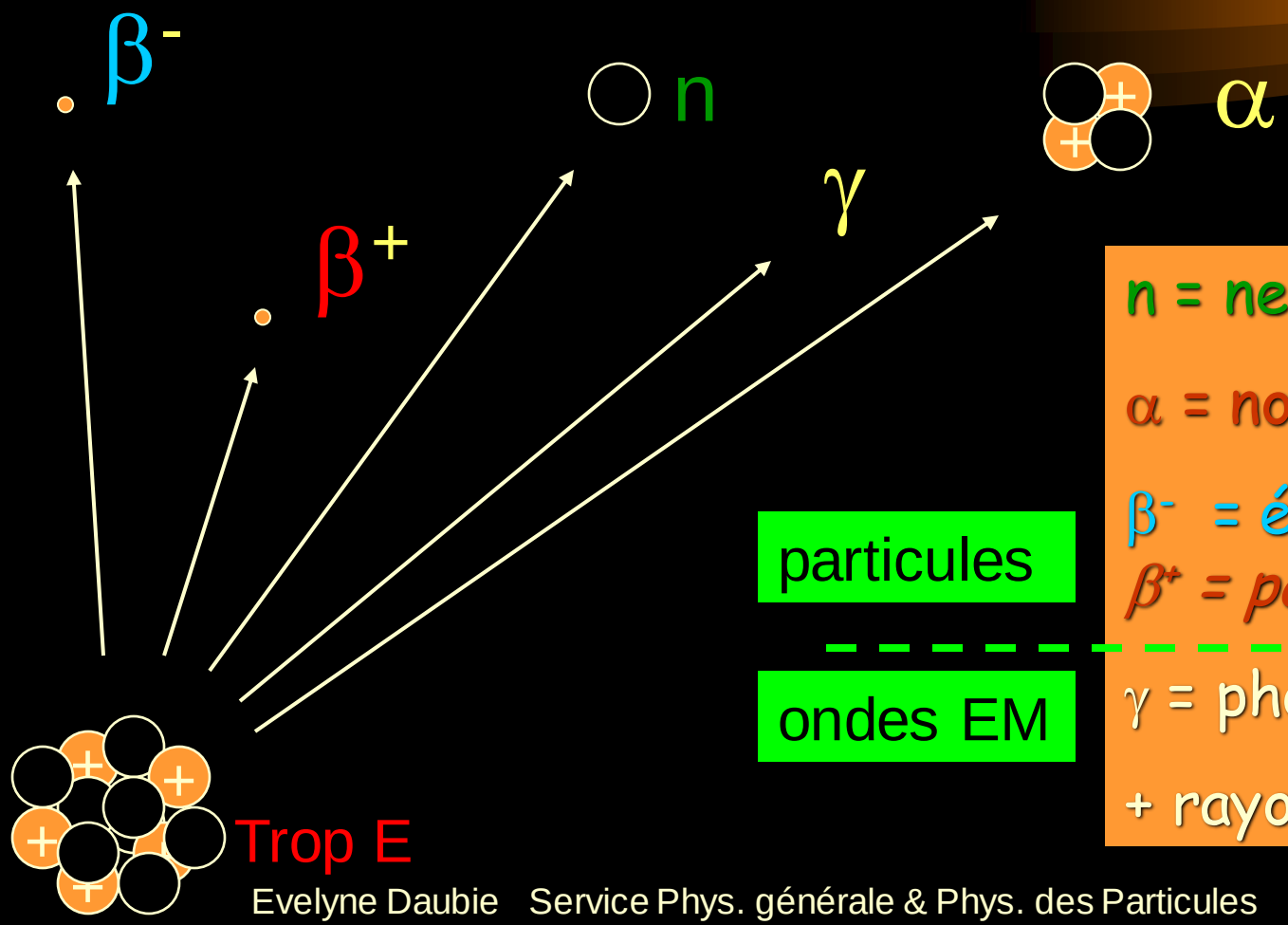


noyau instable → spontanément autre noyau

par émission de rayonnement

La radioactivité

Les rayonnements émis



n = neutrons

α = noyaux He

β- = électrons

β+ = positrons

particules

ondes EM

γ = photons

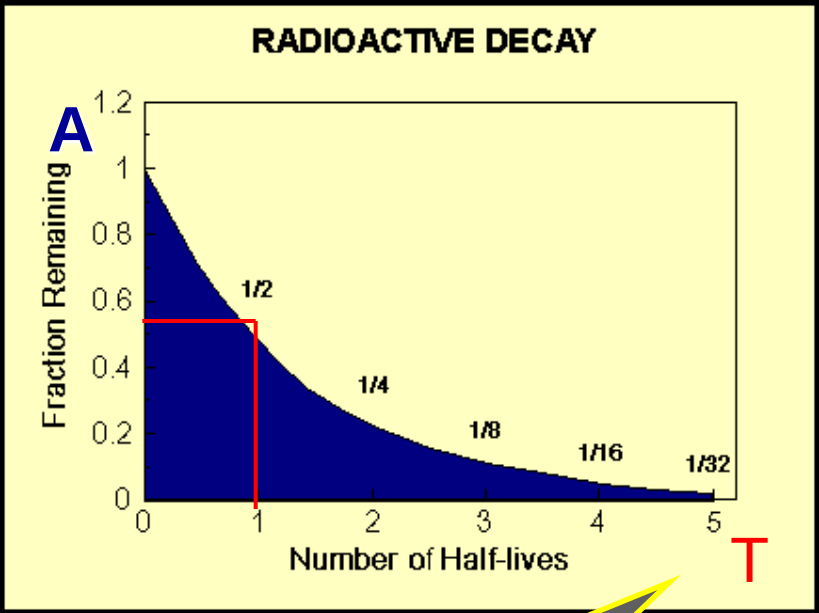
+ rayons X

L'activité et la demi-vie

Activité = #noyaux se désintégrant par sec

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$$

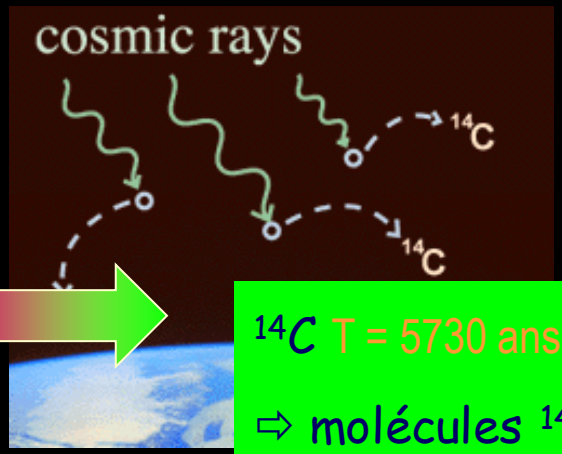
unité : Bq = 1 désintégration par sec



demi-vie T ou période radioactive = durée nécessaire pour qu'un échantill contenant N atomes radi contienne plus que N/2

Activité → 1% après 7 T
→ 1 ‰ après 10 T

La radioactivité naturelle



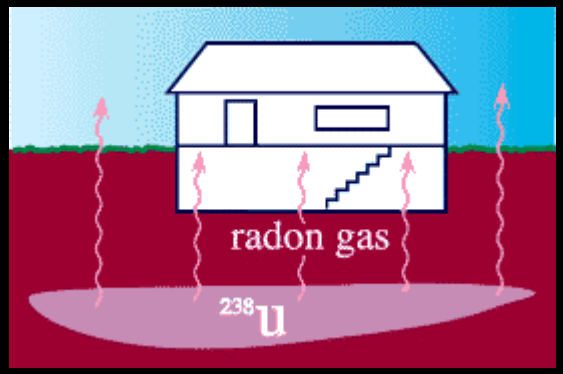
atmosphère

rayonnements cosmiques

Photons, muons, neutrons, … +

^{14}C T = 5730 ans s'échange avec ^{12}C stable

⇨ molécules $^{14}CO_2$ absorbées par plantes ⇨ animaux ⇨ nous ..



écorce terrestre

rayonnements telluriques

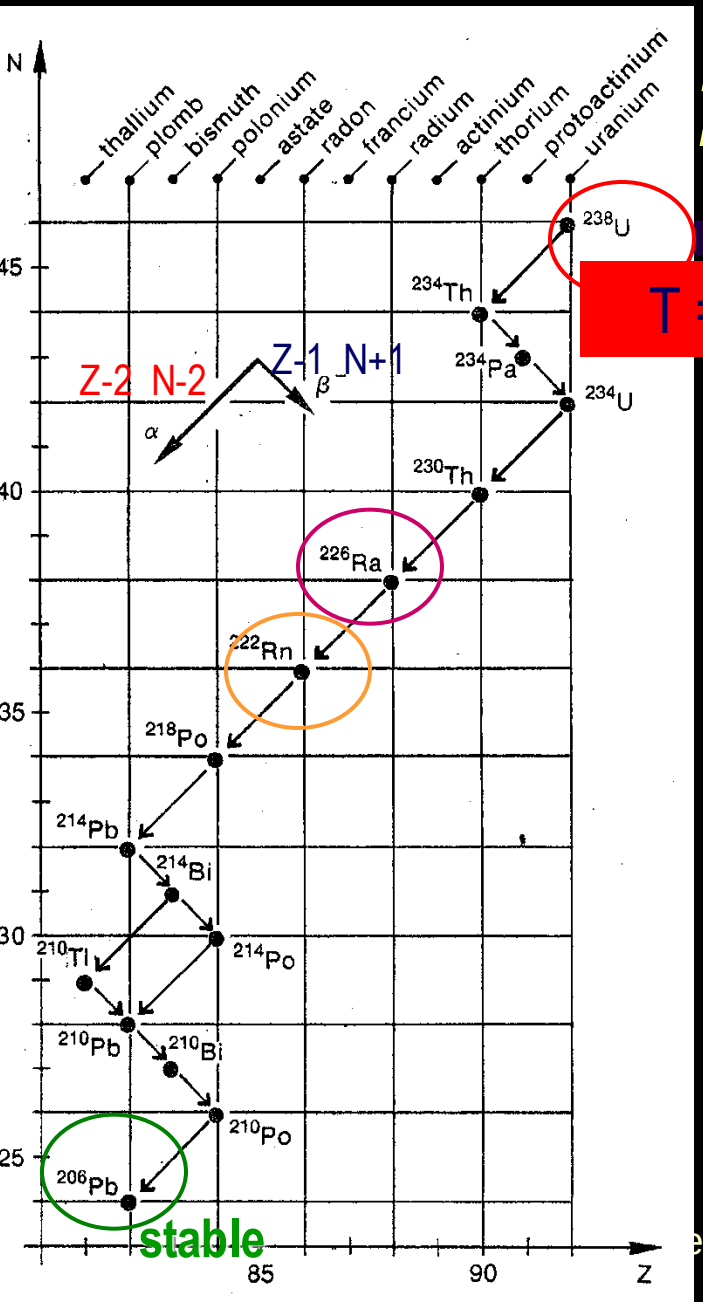
radio-elements ^{40}K, ^{32}P, … +

familles U, Ra, Rn, Th, Tn

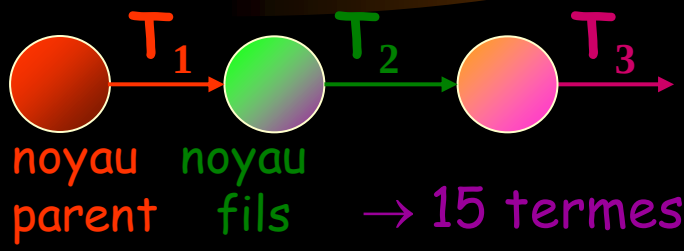
granit maisons : alimente air en ^{222}Rn particulièrement nocif car inhalé → fixé dans les poumons !

uranium - radium

familles radioactives



T =4,5 10^9 ans



Mr & Mme Curie

$N_{Ra}/N_U \approx 10^{-6}$ ⇨ tonnes minerai U traitées pour extraire 1 g Ra

Activité de quelques « sources »

Historiquement, 1Ci = activité de 1 g radium : 1 Ci = 3,7 10^{10} Bq = 37 GBq

Milieux naturels

Eau de pluie	0,3 à 1 Bq/l
Eau de rivière	0,07 Bq/l (^{226}Ra et descendants)
	0,07 Bq/l (^{40}K)
	11 Bq/l (^{3}H)
Eau de mer	14 Bq/l (^{40}K essentiellement)
Eau minérale	1 à 2 Bq/l (^{226}Ra, ^{222}Rn)
Sol sédimentaire	400 Bq/kg
Sol granitique	8000 Bq/kg

Notre corps : 12000 Bq (6000 dus au ^{40}K) T ≈ 10^{9} ans

radon (^{222}Rn) contenu dans 1 m^3 d'air atmosphérique : 5 Bq

minerai d'uranium à 10% (activité uranium) : 1,3 10^{-4} GBq par kg

---

sources pour la gammagraphie industrielle : 4 à 40 GBq

sources de ^{60}Co pour la radiothérapie : 75 à 200 10^{3} GBq

bombe atomique à fissions : 7,4 10^{13}GBq (1 min après l'explosio

Les radio-isotopes artificiels

Produits lors de réactions nucléaires

Production de radio-phosphore à partir d'aluminium

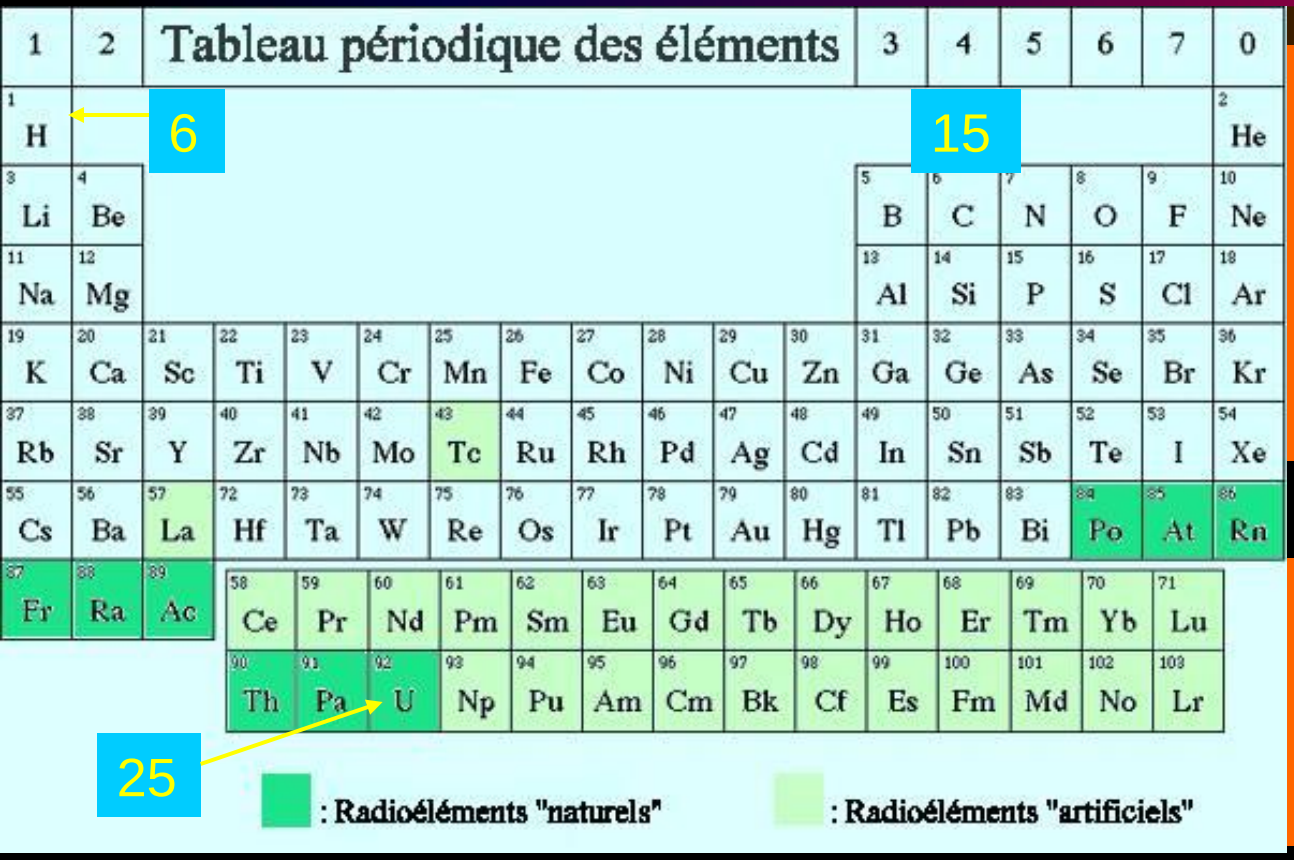
$$\alpha + Al \rightarrow P + n$$

$$P \rightarrow Si + \beta$$

Irène et Frédéric Joliot –Curie
1934

La radioactivité artificielle

Les 3000 nucléides



115 éléments X

90 naturels

Pas d'élém. naturel stable Z>83 A>200

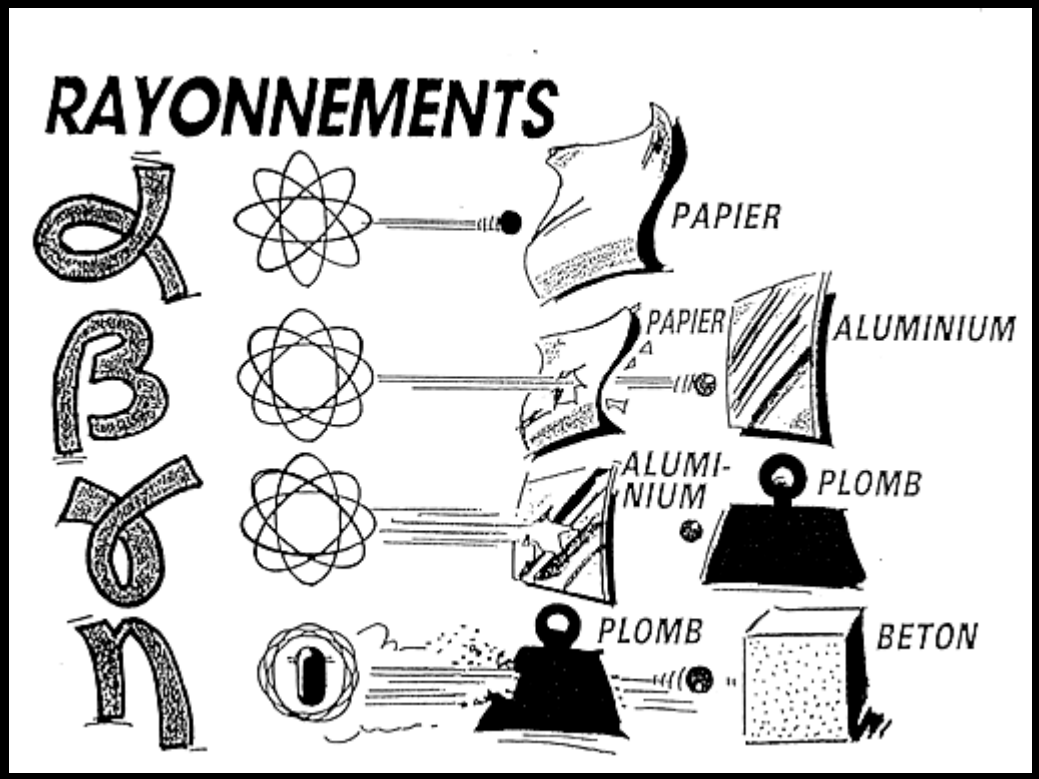
25 artificiels

≈3000 nucléides

≈300 stables

≈2700 radionucléides

2. Les rayonnements ionisants

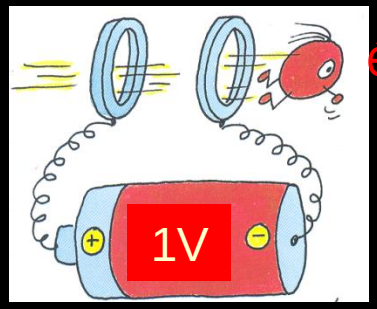


interactions avec la matière

expression des énergies

Le joule = unité d'énergie inadaptée à l'échelle microscopique

⇨ électron volt (eV)



$1\ eV = 1{,}60 \cdot 10^{-19}\ J$

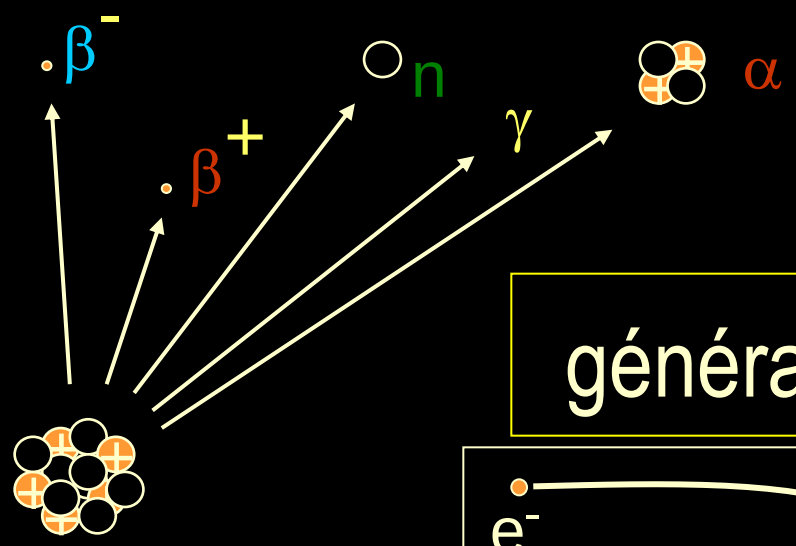
et ses multiples

le keV: $1\ keV = 10^3\ eV = 1{,}60 \cdot 10^{-16}\ J$

le MeV: $1\ MeV = 10^6\ eV = 1{,}60 \cdot 10^{-13}\ J$

origine & énergie des RI

radionucléides



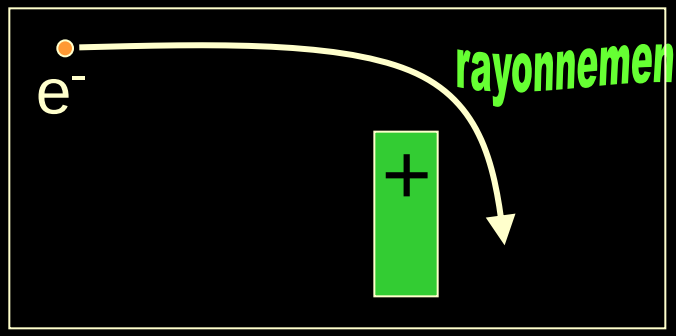
Energie :

MeV

n : eV - MeV

générateur RX

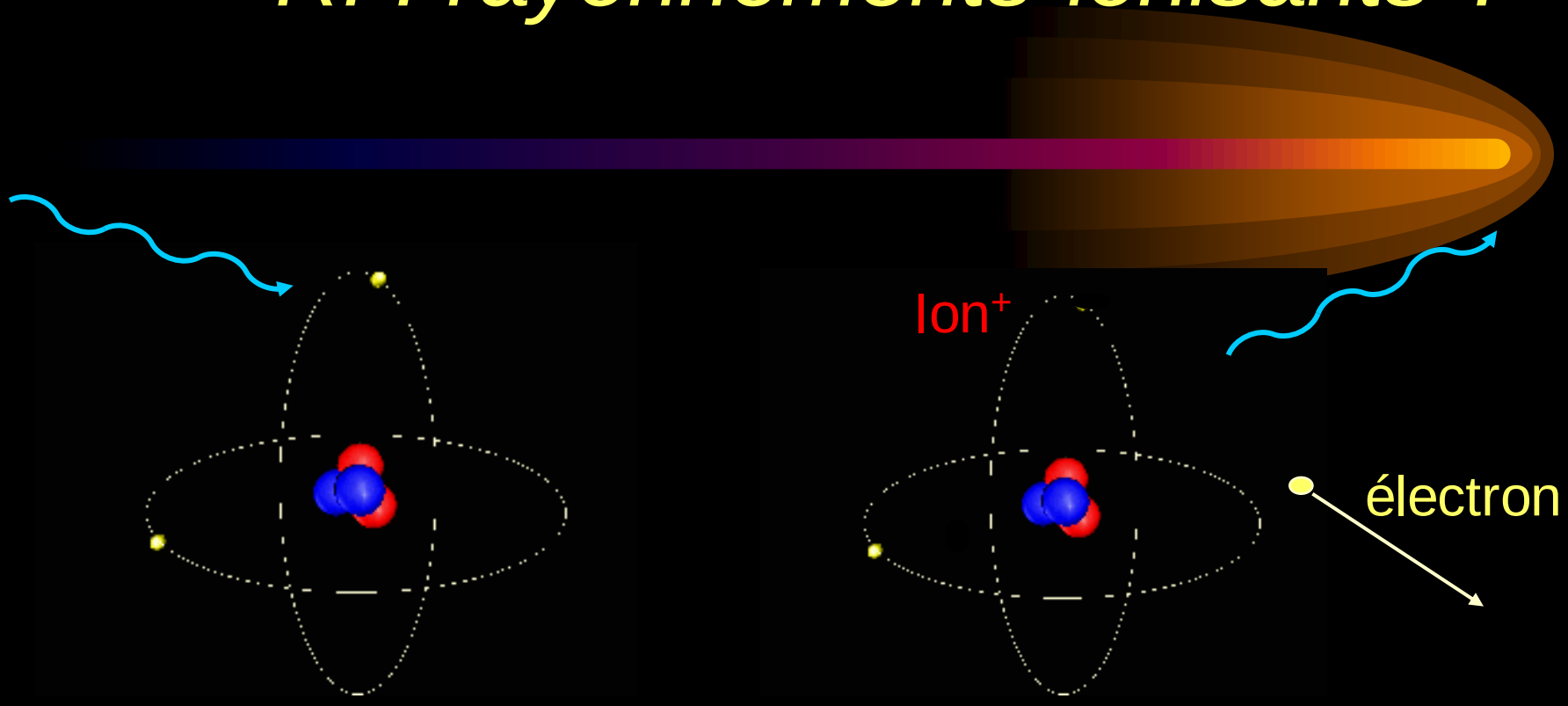
10 - 100 keV



rayonnement X de fr

GeV

RI : rayonnements ionisants ?



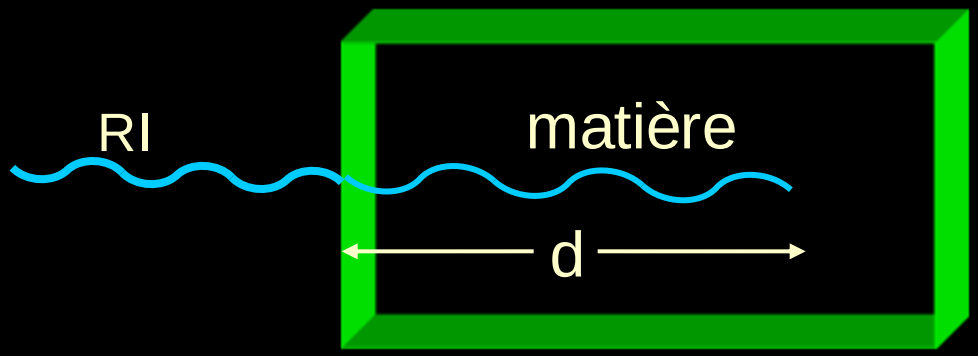
RI perd « paquets » $\Delta E >$ potentiel d'ionisation des atomes matière rencontrée

Création ion^+ / e^-

Rayonnements ionisants

interactions avec la matière

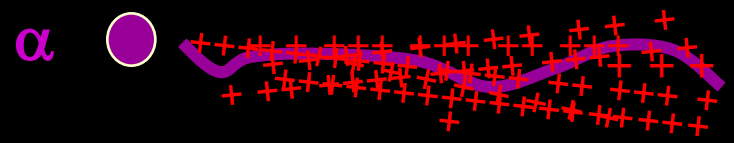
la probabilité d ' interaction
RI-matière dépend
1°/ de la nature du rayonnement
2°/ du milieu considéré



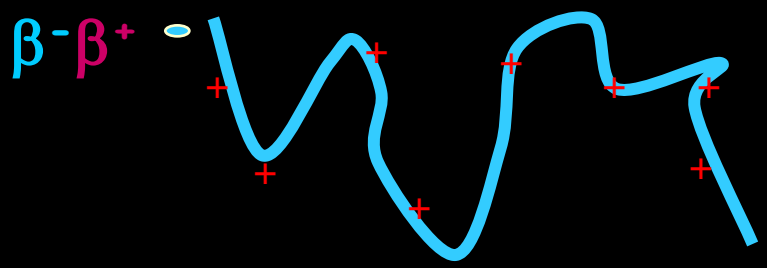
Calculs & exp…
Perte énergie par unité longueur
$\Delta E/\Delta x$
⇓
Parcours d
⇓
Écrans de protection

Les particules chargées

lourdes (α , protons) $\Delta E/\Delta x$ élevé $\rightarrow$ parcours limité : air < 10 cm , tissus : 2 à 4 cellules , arrêtés par couche cornée de la peau



≈ 50 000 ionisations /cm air



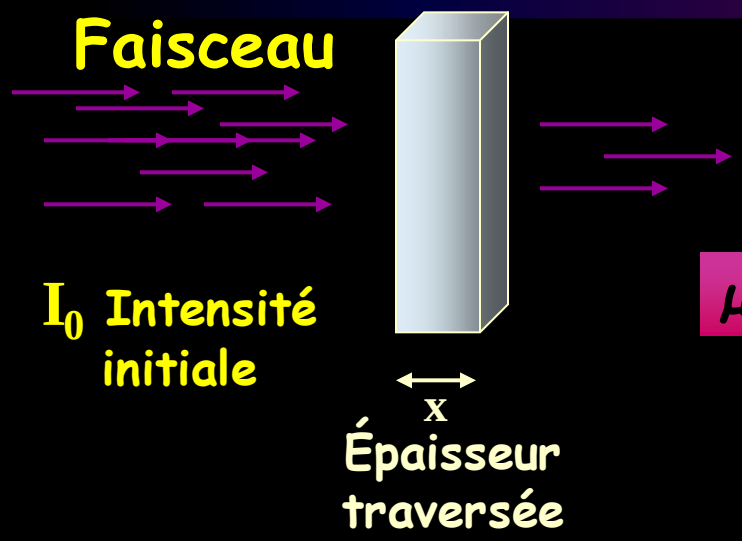
≈ 100 ionisations /cm air

légères (β^- , β^+) $\Delta E/\Delta x$ faible $\rightarrow$ parcours sinueux : air : qq m ; tissus ~ 1 cm

+ annihilation (β^+) avec émission de 2 γ de 511 keV

+ rayonnement X de freinage

Les rayonnements électromagnétiques (X , γ)



Intensité transmise

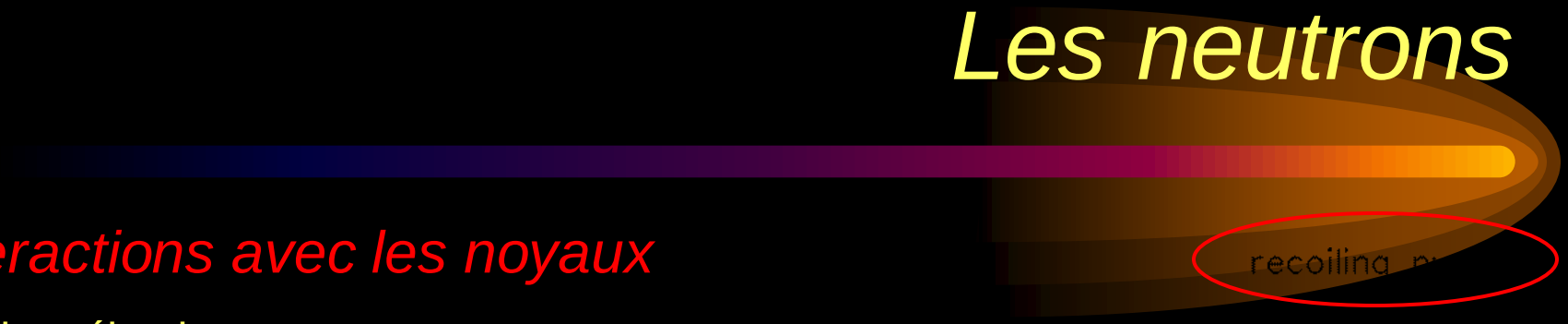
$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}$$

μ= coefficient d'atténuation linéique [cm^{-1}]

pour un matériau donné → probabilité d'interaction des photons → coefficient μ

parcours (pratique) = longueur de demi absorption : long
air > 10 m (arrêtés par cm Pb) ⇨ tissus et organes profonds atteints

Les neutrons



interactions avec les noyaux

- choc élastique (neutrons rapides-noyaux légers)

  choc inélastique (neutrons rapides-noyaux lourds)
- capture radiative (neutrons lents)

  capture non radiative (neutrons lents ou rapides)

ATTENTION aux ray^{ts} 2^{daires}

parcours : air > 100 m

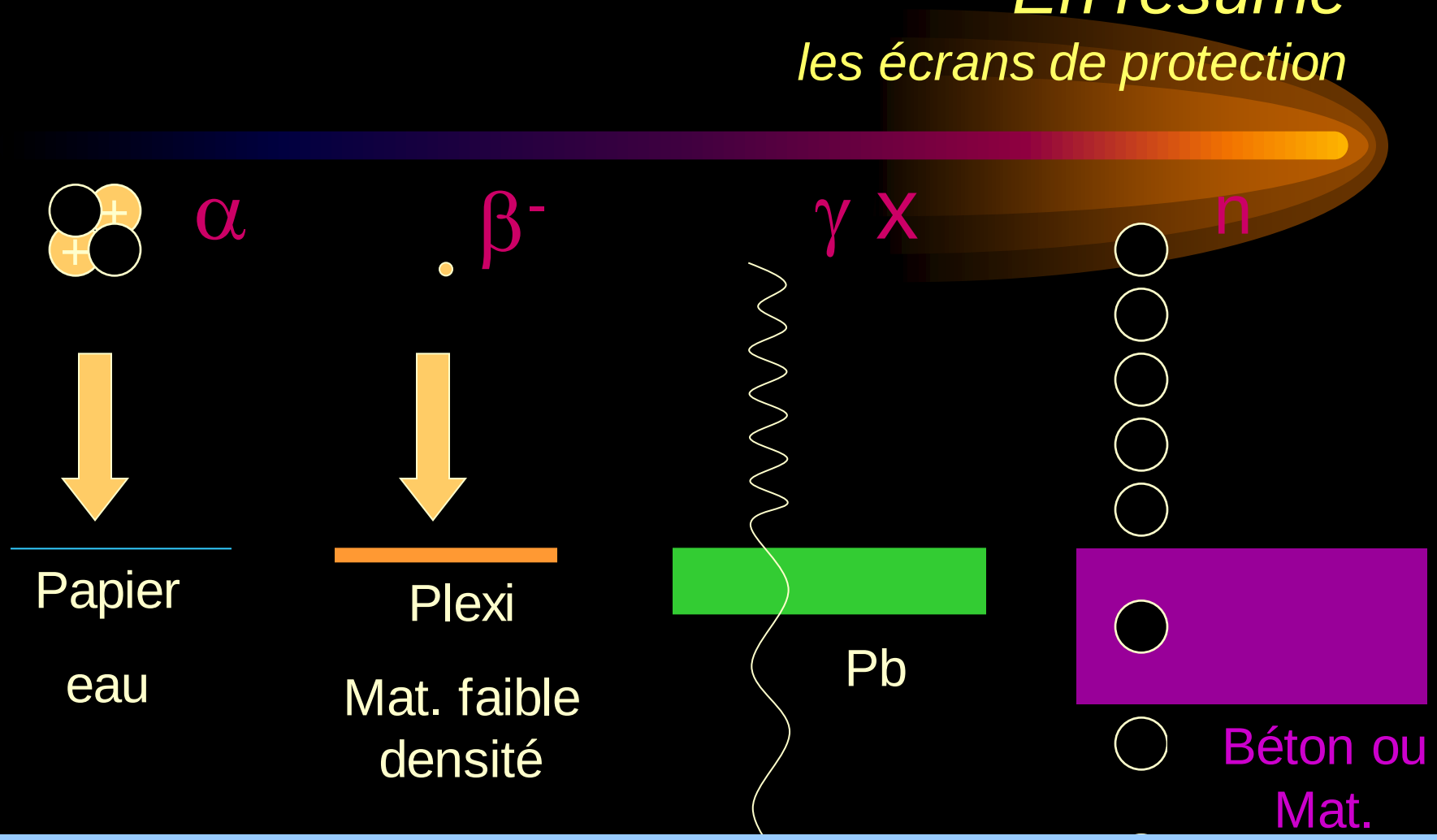
pas arrêtés par Pb

⇨ tissus vivants : dégâts importants

(protons de recul)

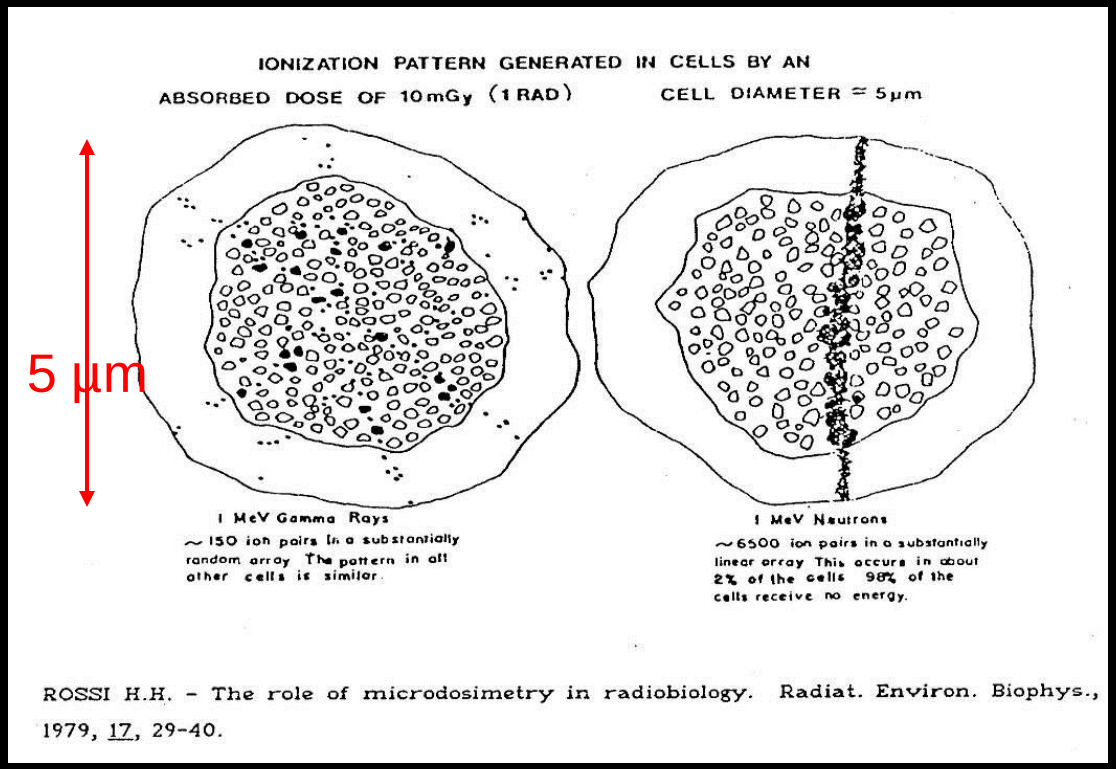
En résumé

les écrans de protection



AIR : qqs cm | qqs m | qqs 10m | qqs 100m +Cd

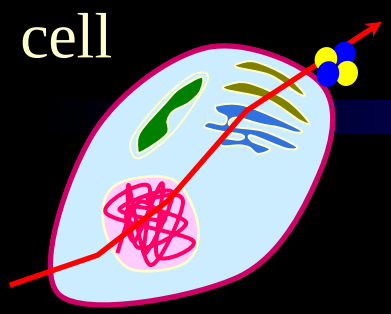
3. Les rayonnements ionisants



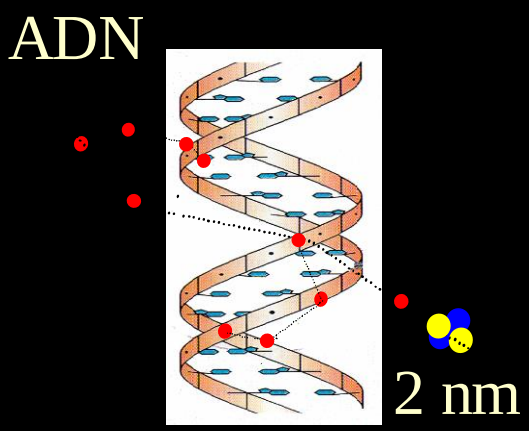
ROSSI H.H. - The role of microdosimetry in radiobiology. Radiat. Environ. Biophys., 1979, 17, 29-40.

effets sur la matière vivante

rayonnements ionisants sur matière vivante



α, β, γ, X, n : **rayonnements ionisants** car créent dans cellules traversées des ions⁺ et des ions⁻ (radicaux libres très nocifs) en y perdant une partie de leur énergie



E perdue par RI dans matière : **keV**, **MeV**

À comparer à l'énergie qui lie une cellule vivante : ≈**100 eV** quand la radiation est reçue lors de la **division de la cellule**

Atomes mat viv : C H N O avec $E_{liaisons}$ H-H, O=O, N≡N ≈5-10 eV

Cellules sensibles aux RI

En particulier : les cellules indifférenciées (cellules du sang) ou en division rapide (cellules germinales ou tumorales) sont très sensibles aux rayons

Caractéristique utilisée en radiothérapie, pour détruire les cellules cancéreuses

Rayonnements ionisants effets biologiques

- Ionisation d 'atomes ou molécules

cascade d 'événements dans les cellules

effets immédiats

destruction des tissus

effet

cancers

héréditaires

À creuser …
Pas spécialiste …

Rayonnements ionisants

effets biologiques

Effets déterministes

- Fortes doses
- Délai d 'apparition court
- Effets à seuil
- Gravité ↑ avec la dose

Tremper main dans eau chaude (T° seuil)

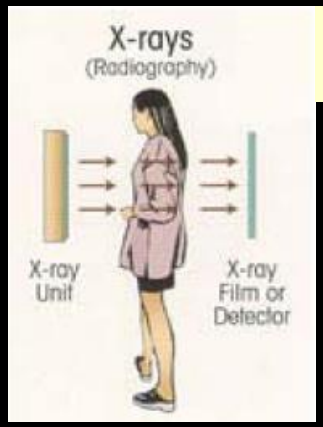
Effets aléatoires

(stochastiques)

- Faibles doses
- Délai d'apparition long
- Pas de seuil
- Chez les individus atteints : effets identiques quelle que soit la dose
- Probabilité d'apparition ↑ avec la dose

Proba accident en roulant en voiture

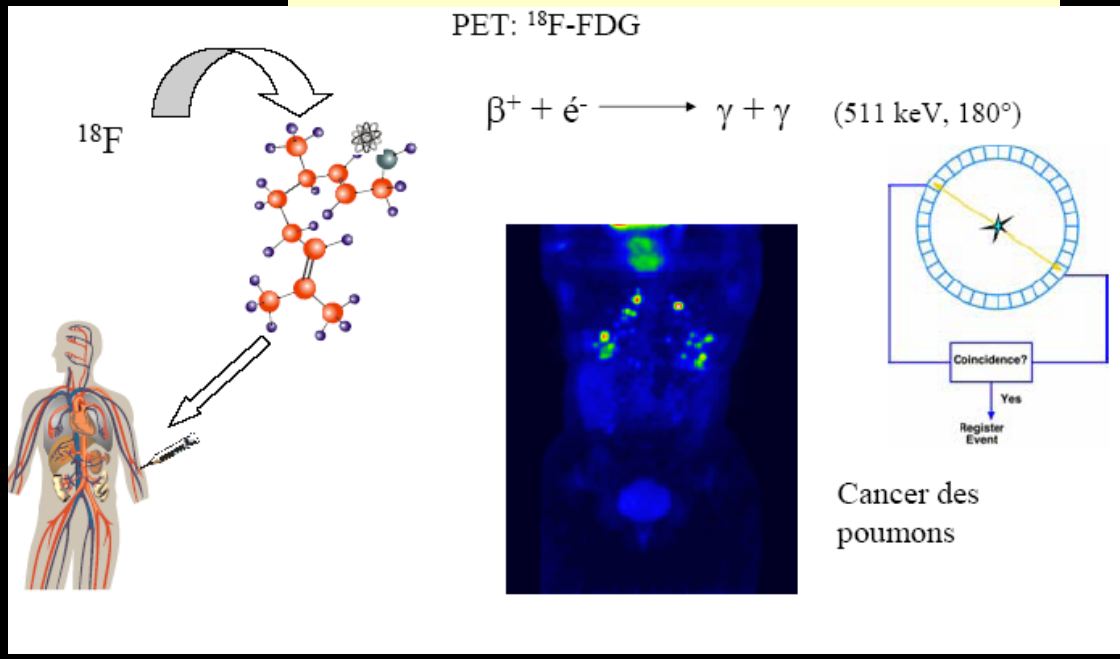
4. Irradiation - contamination



Imagerie tradionnelle

Diagnostique médical

Caméra à positrons



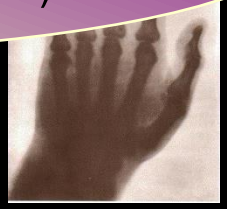
Risque d'irradiation

globale ou partielle

- dès que l'organi
  est susc
  d'intercepter
  rayonneme
  ionisants

L'irradi
pas

Appréciée via résultats fournis par détecteurs individuels (dosimètres)



Irradiation externe ou interne

Source à l'extérieur du corps humain (radio-isotope, accélérateur)	Source à l'intérieur du corps après ingestion ou inhalation d'un radio-isotope

Risque de contamination

Appréciée par mesure du transfert de la contamination entre la surface incriminée et papier ou tissu (frottis)

Appréciée par spectrométrie γ humaine ou analyses biologiques (ex urines)

susceptible

contact direct

substance radioactive

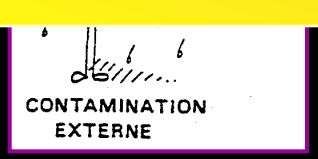
voies directes

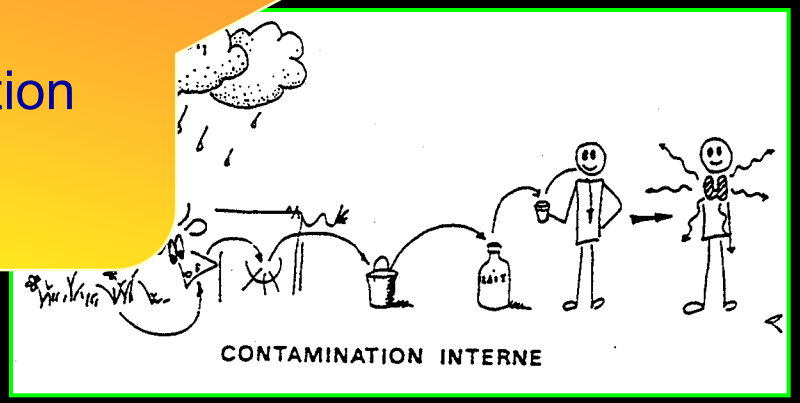
blessure

Contamination externe ou interne

Contamination interne diminue suivant 2 voies :
- décroissance source (demie-vie T)
- élimination naturelle (demi-vie d'élimination biologique)

Dépot sur peau, cheveux





Personnes concernées

- Risque de contamination lors de travaux avec des substances radioactives en source ouverte !!!!

Personnes utilisant générateurs RX ou sources scellées (en bon état !):

Pas soumises aux risques de contamination

Rayonnements ionisants

applications

Les sources utilisées dans l 'industrie	*Principales applications*
Sources radioactives scellées. Générateurs de rayons X.	Radiographie - analyse,détection,dosage de molécules - jauges radiométriques- éliminateurs d 'électricité statique- détecteurs de fumée - radiotraitements chimiques - radiotraitements biologiques
Sources radioactives non scellées.	Utilisation de radionucléides comme traceurs : recherche biomédicale - études hydrologiques - tests de ventilation - détection de fuites gazeuses. Fabrication d 'objets lumineux.

Personne contaminée ⇨ irradiée

⇨ irradiation non homogène dépendant

- de la nature du radio-isotope

  Émetteurs β : irradiations locales des tissus

  Émetteurs γ : irradiations d'un plus grand volume de tissus

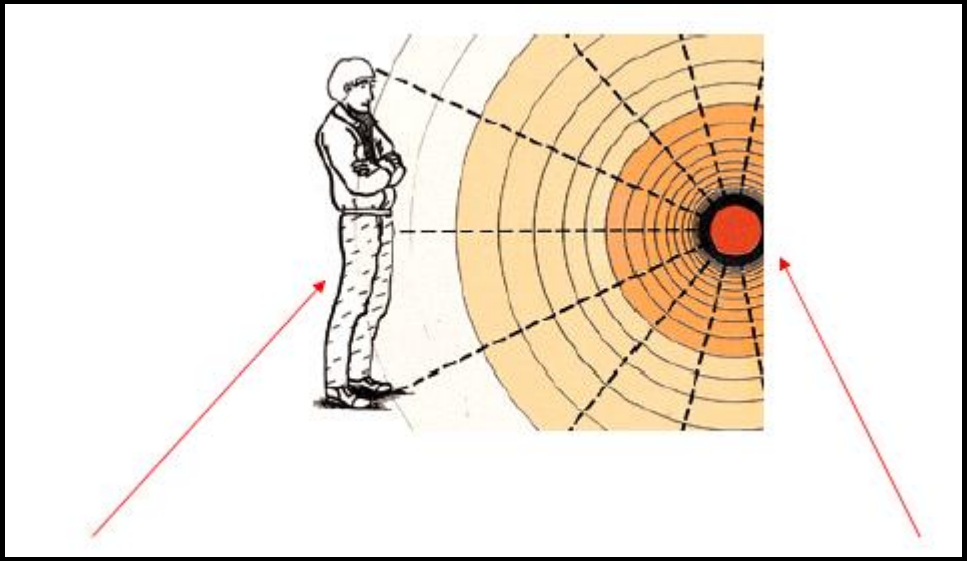
^{3}H, ^{14}C contamination de la peau ⇨ irradiation partielle de la peau

- du métabolisme de la substance

contamination ^{131}I sous forme d'iodure : irradiation de la thyroïde car cette substance se concentre à ce niveau

5. Définition des doses d'irradiation

Définition des unités



La cible La source

Dose absorbée

tenir compte des effets dans la matière

Dose absorbée

$$D = \frac{dE}{dm}$$

1 Gy = 1 Gray = 1 J/kg

Vieille unité: rad = Roentgen Absorbed Dose

1 Gy = 100 rad

Dose équivalente ou équivalent de dose

tenir compte de la nature du rayonnement

Pour une même dose absorbée, effet biologique des Rα est 20 fois plus important que celui des Rγ

Dose équivalente : $H = W_R D$

$1\ Sv = 1\ Sievert = W_R \times 1Gy$

Vieille unité: rem = Roentgen Equivalent Man

1 Sv = 100 rem

Dose équivalente ou équivalent de dose

facteurs de pondération radiologique (W_R)

RBE Relative Biological Efficiency **QF** facteur de qualité

Nature	Energie	W_R
Photons	toutes	1
Electrons	toutes	1
Neutrons	<100 keV	10
	100 keV-2 MeV	20
Particules alpha		20

Débit de dose

tenir compte du temps d'irradiation

- Débit de dose : dose reçue après un certain temps

Sv / h

10 μSv/h = 1 mrem/h

Dose efficace

tenir compte de la radio-sensibilité du tissu / organe touché

- Dose efficace $\mathbf{E = \Sigma\,(H_T \times W_T)}$

  W_T : facteur de pondération tissulaire

Sievert

Dose efficace

facteurs de pondération tissulaire (W_T)

Organe	
Gonades	0,20
Seins	0,05
Moelle osseuse	0,12
Colon	0,12
Poumons	0,12
Estomac	0,12
Vessie	0,05
Foie	0,05
Oesophage	0,05
Thyroïde	0,05
Os	0,01
Peau	0,01
Reste de l 'organisme	0,05
Total	1,00

Appréciation pratique : le Sv

En Suisse, la dose reçue est d'environ de 2 à 6 mSv /an. Elle dépend essentiellement de la composition géologique du sous-sol et de l'altitude.

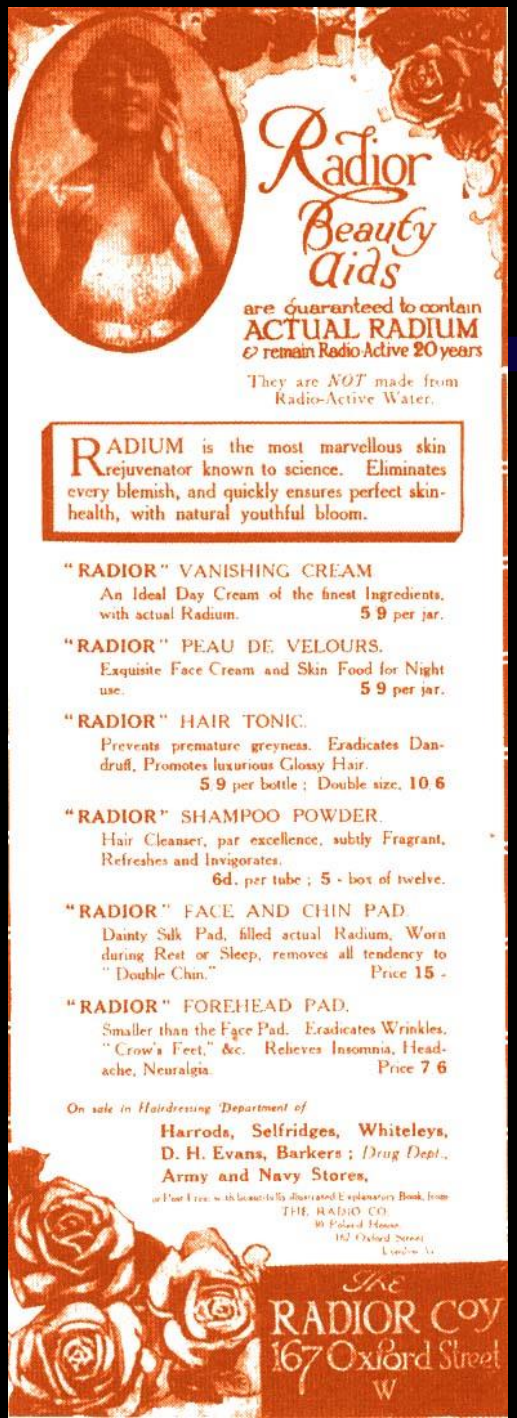
- probable que cette dose provoque un certain nombre d'effets génétiques (mutations). Cependant ce nombre est beaucoup plus petit que celui provoqué par d'autres agents, tels alcool, médicaments, et il n'est pas mesurable.

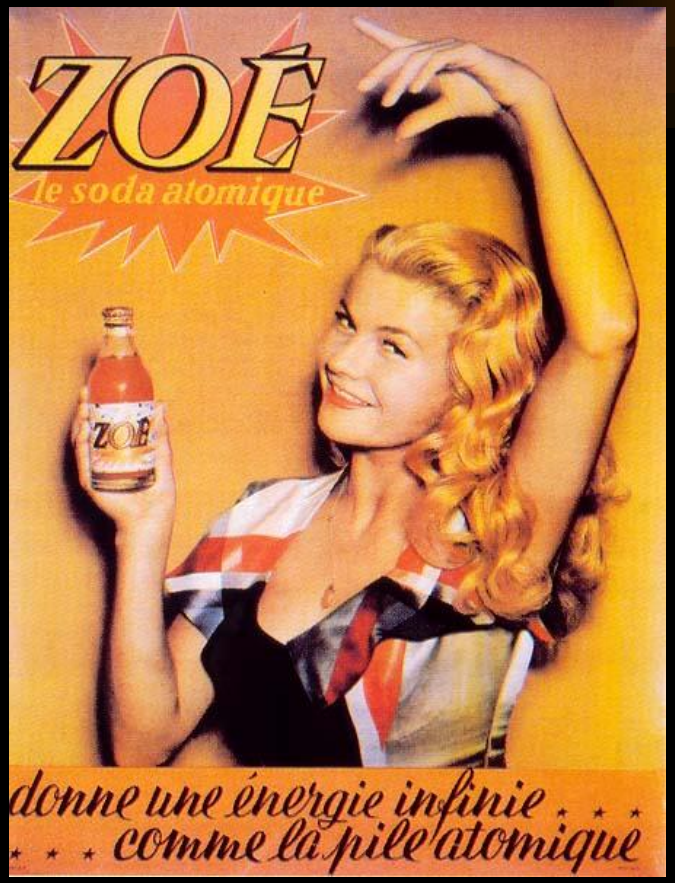
- exposition de courte durée (heures, jour) beaucoup plus dangereuse / longue période (années). Pour **D** reçues sur courte période: aucun effet si $D < 0{,}15$ Sv. Les premiers symptomes de maladies (fatigue, maux de tête, vomissements) apparaissent avec $D \geq 0{,}5$ **Sv** , tandis qu'une dose $D > 6$ Sv est mortelle dans tous les cas.

- certains organes beaucoup plus sensibles que d'autres. On peut tolérer 0.75 Sv/an sur les mains, peu sensibles & pour personnes exposés professionnellement à des rayonnements.

Référence :http://www.unifr.ch/physics/me/cours/methodes/script.html

6. Radioprotection





Vers 1950, même après Hiroshima, l'énergie atomique reste un vecteur porteur pour la publicité

Publicité pour une ligne de produits de beauté parue dans Vogue en novembre 1916

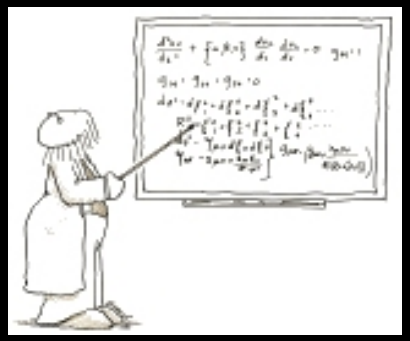
Radioprotection
définition

- Ensemble des mesures prises pour protéger
  - les travailleurs
  - la population
  - les écosystèmes

  des dangers des rayonnements ionisants ……..

  tout en permettant leur utilisation !

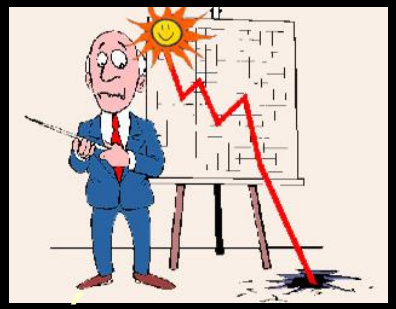
La radio-protection : une compétence interdisciplinaire



Physicien

Legislateur

Biologiste



Économiste,
Sociologue

médecins qualifiés ,
radiopathologistes ,
hygiénistes, …

La législation

- **CIPR** Commission Internatioanle de Protection Radiologique (les experts !)
- **1990** : publie rapport n°60 ⇨ nouvelles recommandations ⇨ directive de l'Union Européenne ⇨ transposée dans les législations nationales ⇨
- **2001** : Arrêté Royal du 20 juillet 2001 (paru au Moniteur du 30 août 2001) ***Règlement Général de la Protection de la Population, des Travailleurs et de l'Environnement contre le danger des Radiations Ionisantes***
- www.fgov.be

Ancien Arrêté (f

AGENCE FEDERALE DE CONTROLE NUCLEAIRE

Les 3 principes fondamentaux

suivant recommandations CIPR

- *Justification* de l'utilisation des RI

  toute activité humaine susceptible d'entraîner une exposition aux RI doit être justifiée par les avantages qu ' elle procure pour la société (bénéfices > inconvénients)

- *Limitation* des doses individuelles

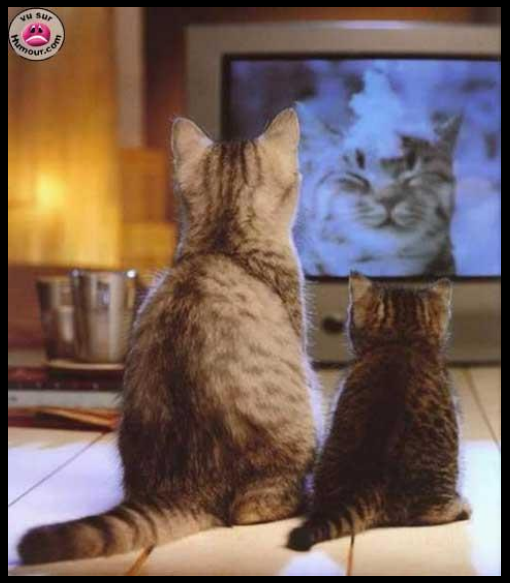
  les limites sont choisies suffisamment basses pour qu ' aucun effet déterministe n ' apparaisse , et que la probabilité d ' effets stochastiques soit « tolérable ou acceptable »

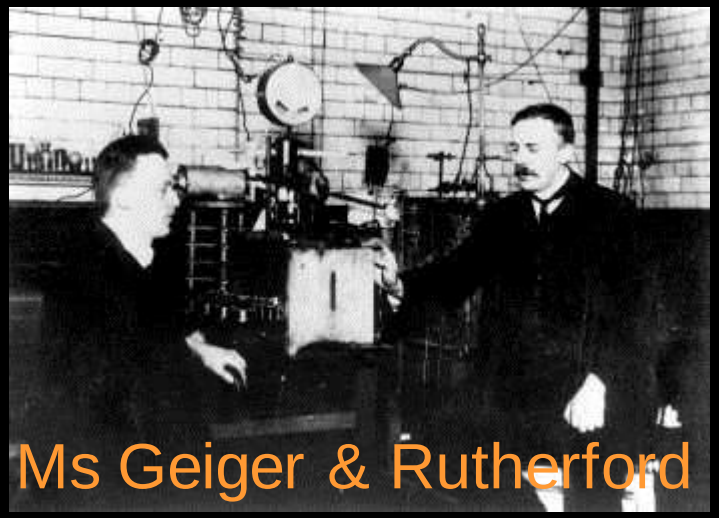
- *Optimisation* de la radioprotection : **ALARA**

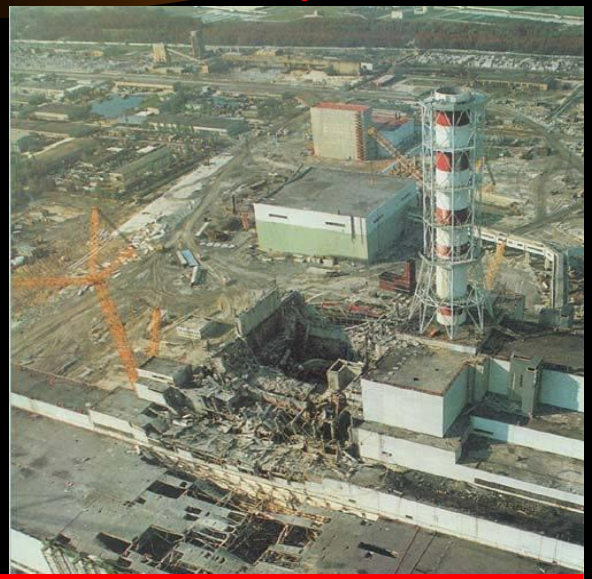
  l'exposition des individus et des populations doit être maintenue au niveau le plus bas que l'on puisse atteindre compte tenu des facteurs économiques et sociaux

7. Limites de doses

acceptables tolérables inacceptables







Avril 1986 : explosion et feu réacteur 4 de la centrale nucléaire de Chernobyl

le public $\neq$ personnes professionnellement exposées

Les sources d 'informations de la CIPR

- Les études in vitro.
- L 'expérimentation animale.
- Les enquêtes épidémiologiques ,

  populations exposées à de faibles doses ,

  population exposée à des doses moyennes ou fortes :

  pour raisons professionnelles

  pour raison médicale

  survivants d 'Hiroshima et de Nagasaki

  accident de Tchernobyl

Radioprotection

problématique de la limitation des doses (CIPR 60)

exposition : inacceptable tolérable acceptable

Calcul de la probabilité de mort due à des expositions à des doses efficaces annuelles de 10 , 20 , 30 , 50 mSv

- 50 mSv/an (dose cumulée sur 50 ans = 2,5 Sv)
  risque de décès dû à l ' exposition atteint avant 60 ans
  La CIPR estime ce niveau de dose inacceptable
- 20 mSv/an (dose cumulée sur 50 ans = 1Sv)
  risque de décès dû à l ' exposition atteint à 70 ans
  La CIPR estime ce niveau de dose acceptable

Risque acceptable

- Risque dû aux radiations acceptable si : comparable au risque de décès dans autres domaines industriels

Occupation	**Annual risk of death**
Steeplejack	$1.4\ 10^{-2}$
Mining (USA)	10^{-3}
Exposure to 20 mSv	10^{-3}
Exposure to 6 mSv	$3\ 10^{-4}$
Construction	$2\ 10^{-4}$

- probabilité de décès de 5 pour 1 million

- 650 km en avion,
- 100 km en voiture,
- la consommation d' une cigarette,
- 2 heures d'exposition passive au tabac,
- 1,5 minutes d'alpinisme,
- 1,5 semaines de travail dans une usine standard,
- 1 heure de pêche en haute mer,
- l'utilisation de la pillule contraceptive pendant 2,5 semaines,
- 1/2 bouteille de vin,
- l'exposition à 0,1 mSv.

Limites de dose

CIPR 60 ou législation belge (AR 20/07/01)

- *Personnel professionnellement exposé* (catégorie A)

  dose efficace : **20 mSv / an** **(par 12 mois consécutifs glissants)**

  dose équivalente peau : 500 mSv / an

  dose équivalente cristallin : 150 mSv / an

  dose équivalente mains, avant-bras, chevilles : 500 mSv/an

- *Public*

  dose effiacce : **1 mSv / an**

  peau : 50 mSv / an

  cristallin : 15 mSv / an

Limites de dose

- *Personnel professionnellement exposé* (catégorie A)

  dose efficace : **20 mSv / an**
- **Apprentis / étudiants > 18 ans : 20 mSV/an**

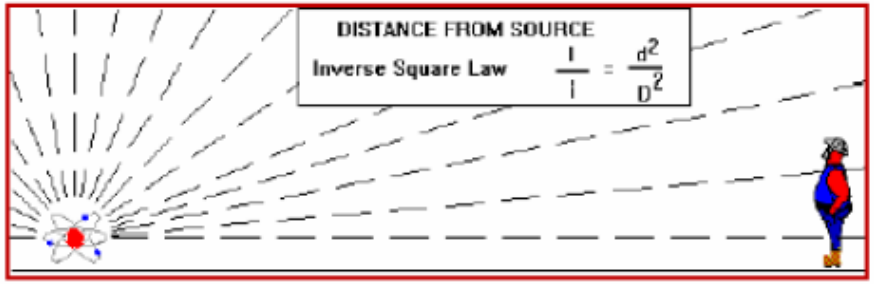
  de 16 à 18 ans : 6 mSv/an

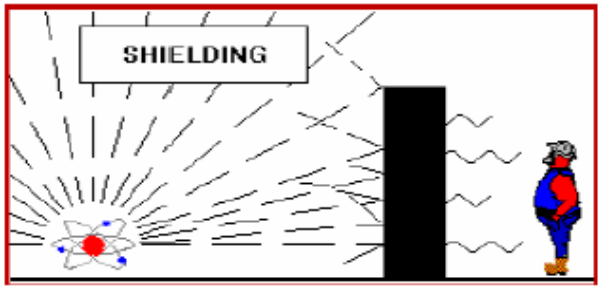
  < 16 ans : 1 mSv/an (comme public)

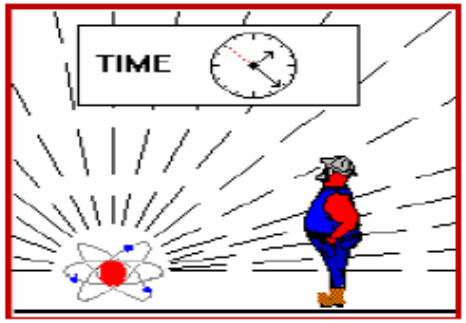
- **Femmes enceintes**
- Irradiation : ≤ **1 mSv** pdt grossesse (si dose dépassée au moment déclaration ⇨ écartée)
- Contamination : aucune femme enceinte ou en période d'allaitement ne peut être affectée à un risque professionnel de contamination radioactive

8. Protection contre l'irradiation

ALARA : As Low As Reasonably Achievable

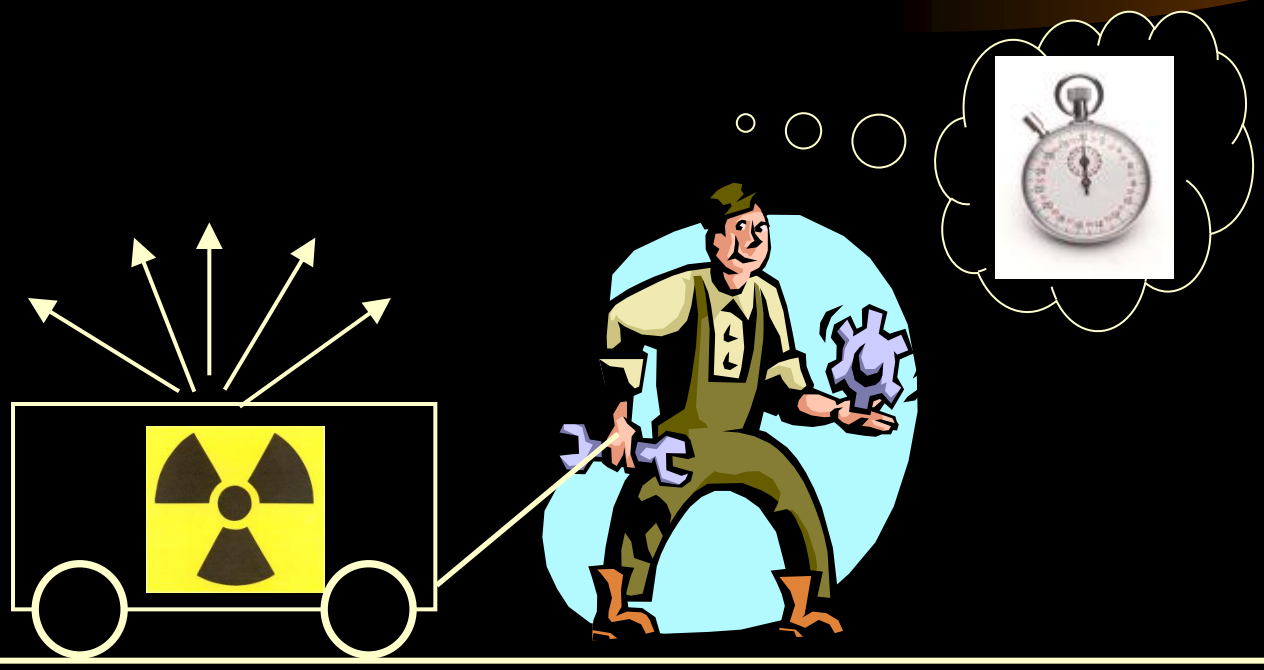






Option 1: Réduire le temps d'exposition

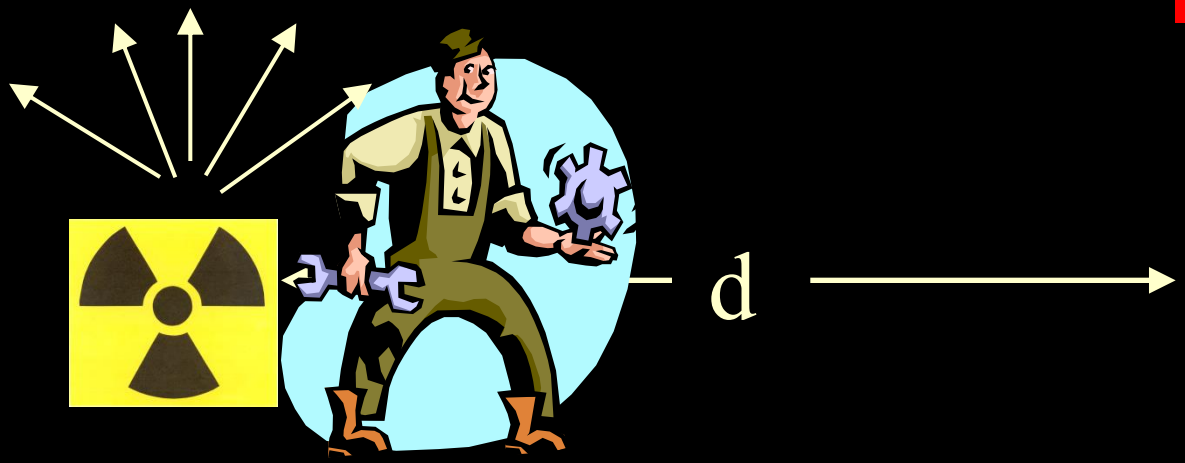
Réflexions, discussions : à l'écart de toute source de radiation !



$$\text{Dose} \propto t$$

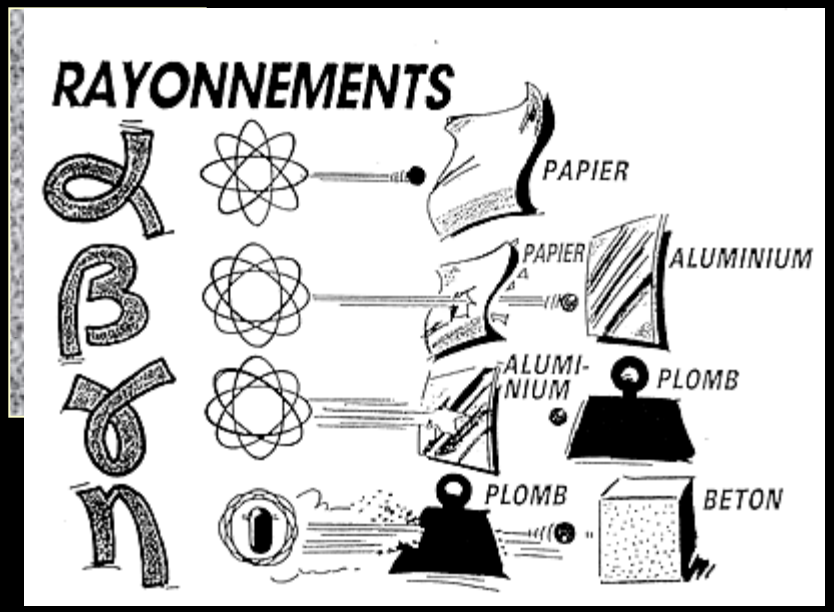
Option 2: Augmenter la distance à la source de radiations

$$\text{Débit de dose} \propto \frac{1}{d^2}$$



Option 3: le blindage atténue fortement le flux de radiations

$$\text{Doserate} \propto \exp\left(-\frac{d}{\lambda}\right)$$



Comment estimer l'irradiation : moniteurs

Utiliser le détecteur adéquat suivant type de radiations

Vérifier son état de fonctionnement (batterie)

Comprendre les unités (rem, Sv, cps …)

Mettre sur la plus petite échelle

Évaluer débit de dose à bout de bras

Si signal saturé : changer d'échelle

8. Protection contre les contaminations

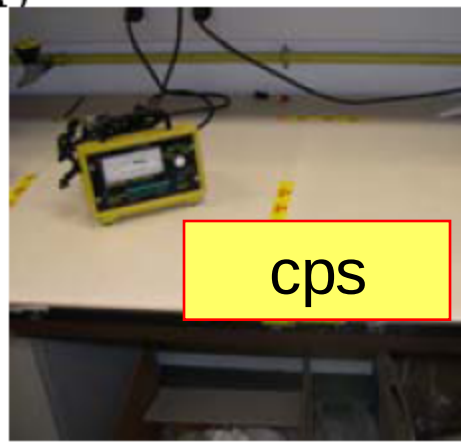
Il suffit de travailler proprement !

d'avoir de l'ordre, d'être adroit ….

ORDRE, PROPRETE, ADRESSE = SECURITE !

Protection contre les contaminations

- Porter des vêtements de protection (tablier, 2 paires de gants),
- Protéger au préalable les tables (Benchcoat) et remplacer fréquemment
- Délimiter les surfaces de travail (Bande adhésive de couleur)
- Signaler via étiquetage (autocollant « radioactif »)
- Eviter la dissémination:
    - Eponger produits renversés
    - Changer papier de protection
    - Eliminer comme déchet radioactif
- NE PAS PIPETER PAR LA BOUCHE
- NE PAS FUMER, BOIRE, MANGER, SE MAQUILLER
- NE PAS REPONDRE AU TELEPHONE, TOUCHER DES OBJETS (poignées, crayons, …)
- Se laver les mains
- Ne pas mélanger le contenu de portemanteaux
- Tester le local, le matériel et soi-même avant de le quitter.



Comment détecter une contamination ?

- Prendre appareil de mesure adéquat, vérifier son état de fonctionnement et sa configuration (blindage β).
- A l'aide d'un papier absorbant, frotter la zone de travail
- S'éloigner de la zone de travail (rester dans le local!!) et vérifier la contamination du papier.
- Noter et décontaminer le cas échéant.

Que faire quand on détecte une contamination ?

- Ne pas s'enfuir !!!
- Marquage de zône/appareil a la priorité sur la poursuite du travail
- Si possible, mettre matériel contaminé dans un sac avec autocollant « radioactif ».
- Délimiter la zone et au besoin fermer le local
- Se tester et empêcher la dissémination (!!! chaussures)
- Les personnes contaminées restent dans le local ou a proximité
- Prévenir le délégué radioprotection permanent de l'unité
- Prévenir le service de radio-protection en précisant l'étendue du problème si incident de grande importance.

Comment décontaminer matériel / plan de travail ?

- préparer sac (marqué avec autocollant radioactif), papier absorbant, détergeant décontaminant (RBS dilué)

- mettre doubles gants

- passer papier imbibé (une seule fois !), vérifier sa contamination, le jeter dans sac

- répéter l'opération jusqu'à disparition de la contamination

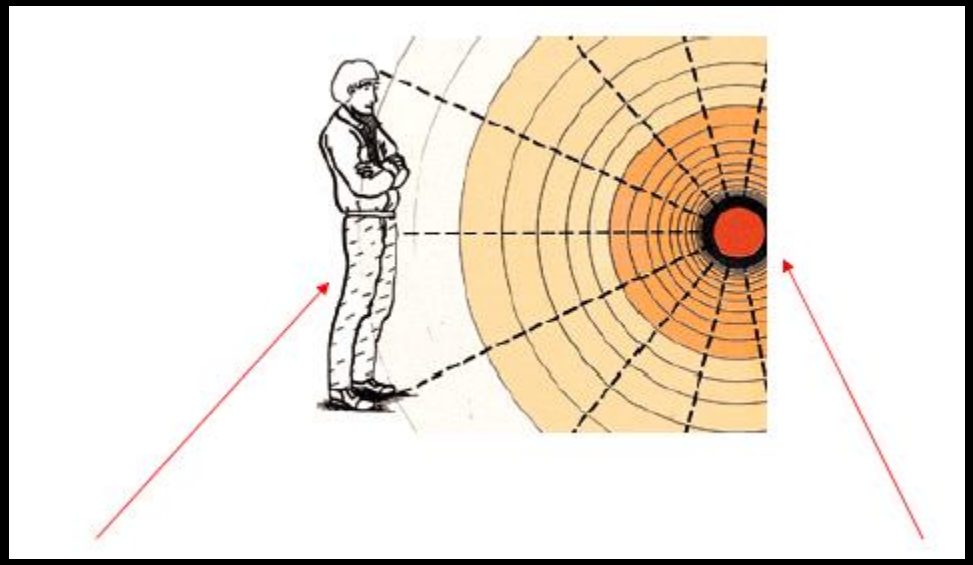
si contamination subsiste : prévenir service de radioprotection

Comment décontaminer une personne ?

- laver surface du corps contaminée au dessus d'un récipient étanche
- vérifier contamination et recommencer si nécessaire
- traiter le liquide de lavage comme déchet radioactif
- vérifier savon, robinet, poignées …

prévenir service de radioprotection !

9. Autres mesures de radioprotection :



La cible

La source

Zones de travail : contrôlées

Seuls les travailleurs autorisés ont accès aux zones à risques :

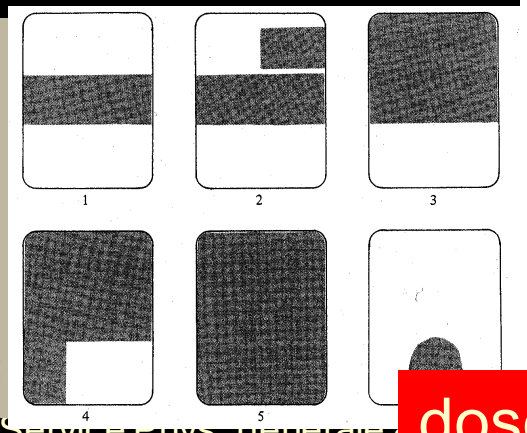
-signalées par sigle (trèfle) radioactif sur portes

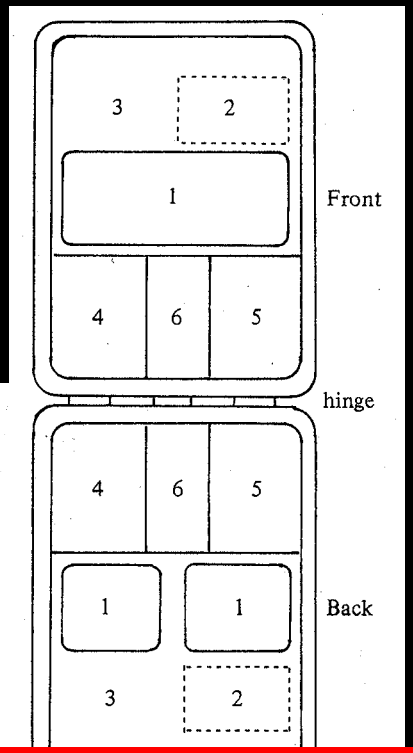
- contrôlées par

Port de dosimètres

Étudiants : stylo-dosimètres ***Direct Reading Dosimeter***

pour personnes dans zones à risque :
dosimètre – plaque photo





doses : 0,1 mSv → 1 Sv

Zone de stockage des sources radioactives & déchets radioactifs

En lieu sûr !!!

- en dehors des moments d'utilisation : sources enfermées dans châteaux de Pb étiquetés

- inventaire détaillé permanent

Fin du 1er épisode …

- **Arrêté royal du 20 JUILLET 2001 :**
- **Art. 25.** Information et formation des travailleurs, apprenti(e)s, étudiant(e)s et personnes susceptibles d'être exposées aux rayonnements ionisants.

« Il faut respecter les radiations, mais non les craindre » K.Z. Morgan

Introduction, manuel « La protection contre les radioéléments », de G. GENAUD, Ed. France-sélection, 1970

Mes « sources » d'inspiration pour cette présentation :

-Présentation « formation personne compétente en radioprotection », HSE-IUT, Bordeaux 1, 2003-2004

-Formation en radioprotection aux FUNDP (version 2006) & Manuel de radioprotection, version 0.9, 2005
http://www.fundp.ac.be/universite/services/sippt/radioprotection.html

-*Utilisation des radionucléides en pharmacie et en médecine*, notes de cours du Prof. Bernard Gallez, UCL, 1997

-*Introduction to Radiation Protection*, summer student lecture, CERN, 2006
http://cdsweb.cern.ch/

-Brochures d'information AIB-Vinçotte CONTROLATOM
http://www.controlatom.be/f/s-documents.htm

Merci à Francis

Extra – slides

Radioprotection

protection opérationnelle des travailleurs exposés

Classification des travailleurs

limite annuelle

Catégorie A

3/10 de la limite annuelle

Catégorie B

Classification des lieux de travail

elle

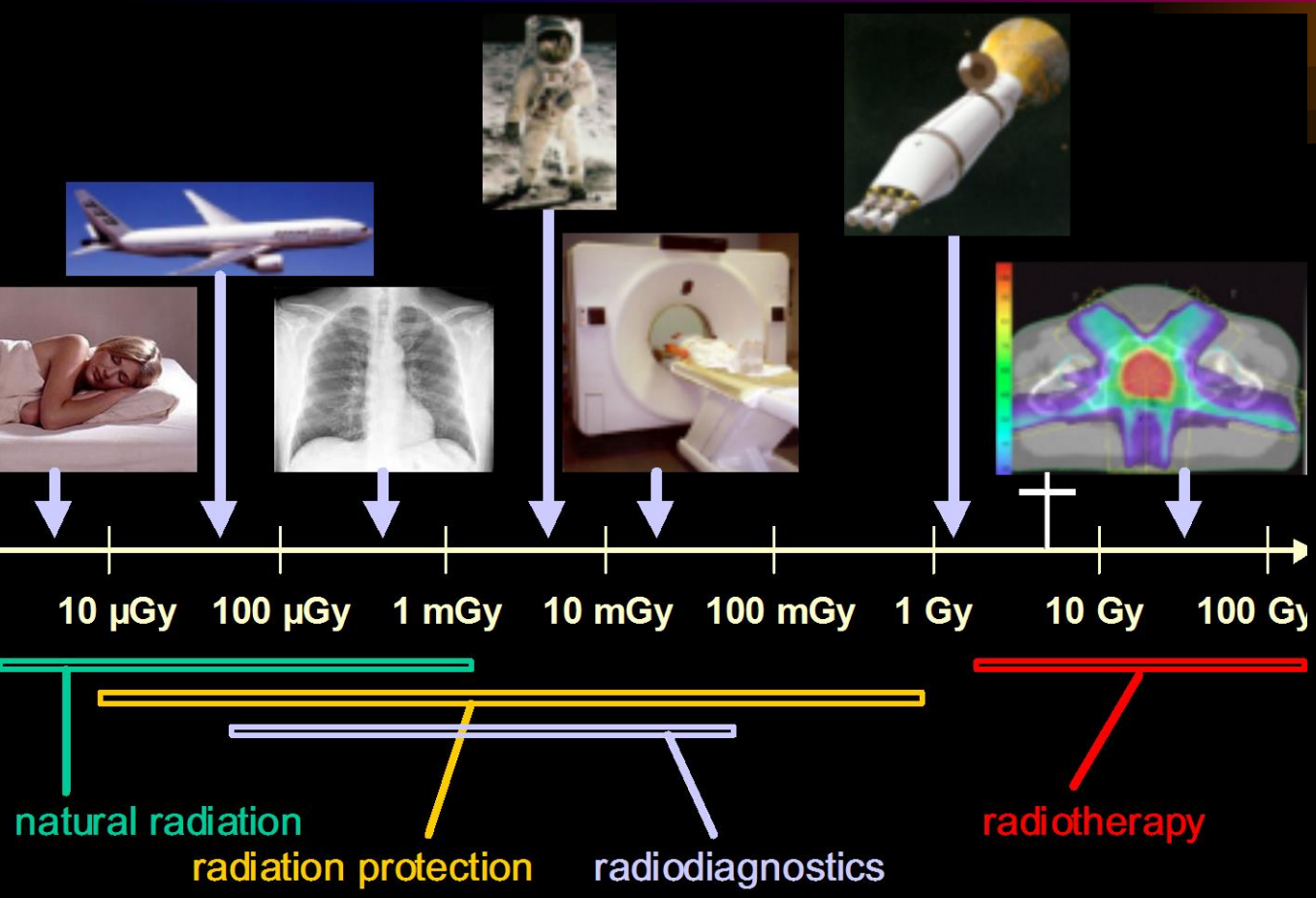
Classe II ou III

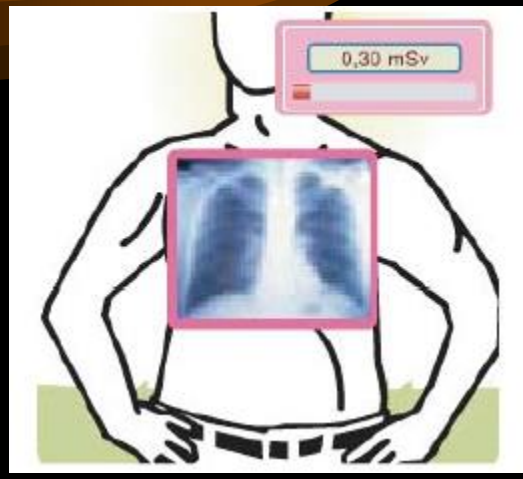
Zone contrôlée

3/10 de la limite annuelle

Zone surveillée

Quelques chiffres …



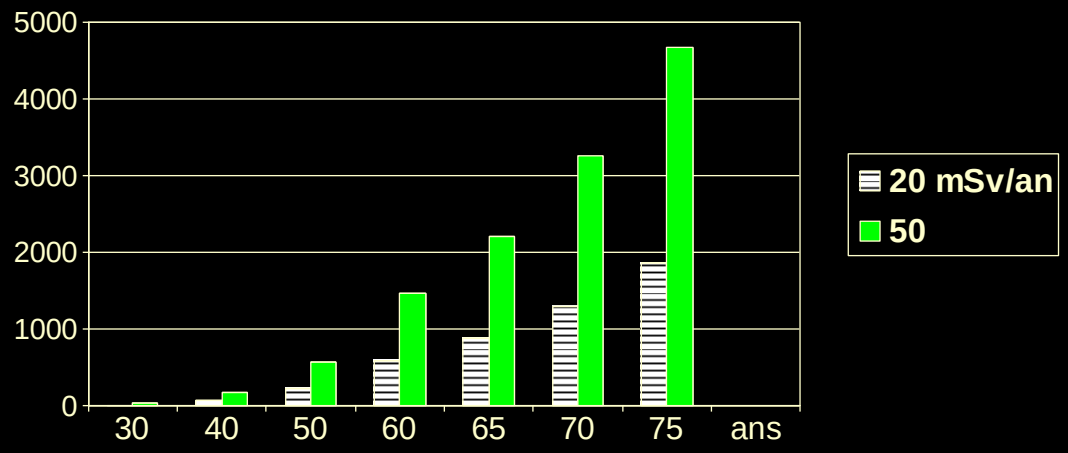


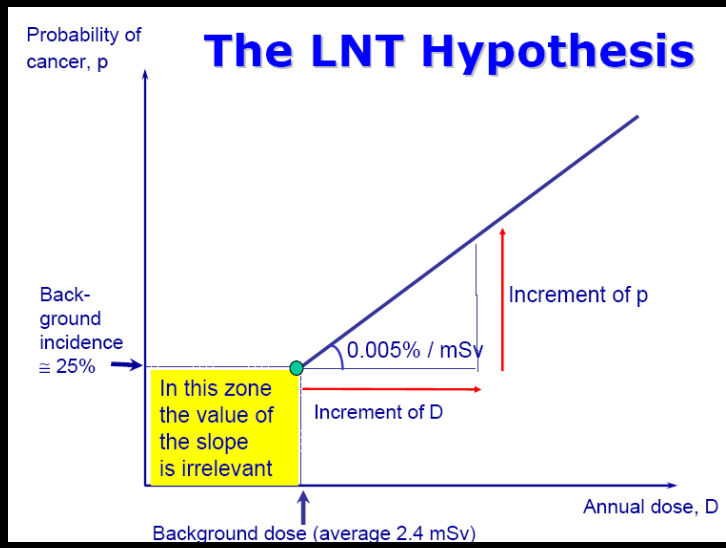
Radiographie pulmonaire

Radioprotection

problématique de la limitation des doses (CIPR 60)

Probabilité annuelle de décès dus au cancer, par million ($p = 10^{-3}$)





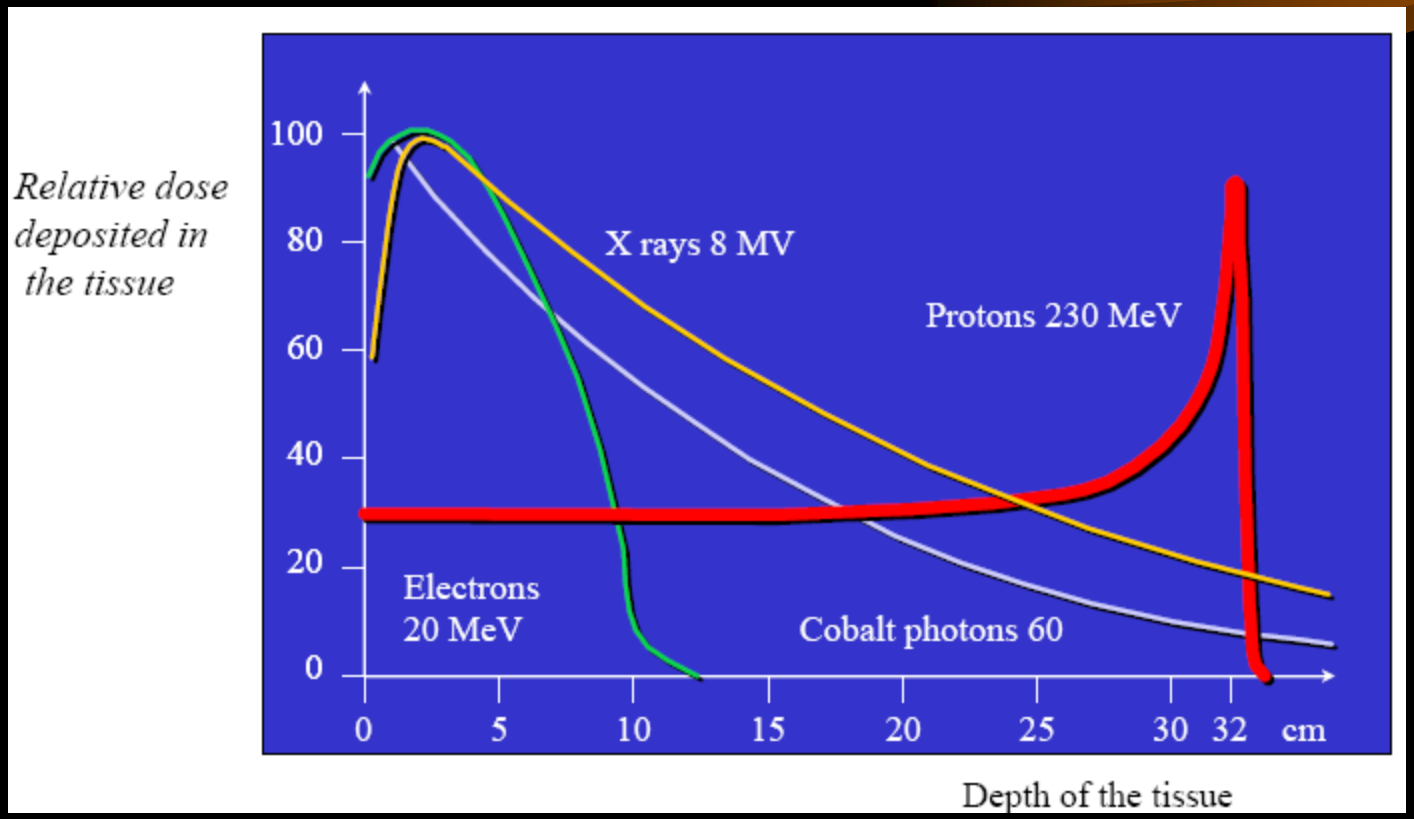
Rayonnement ionisant : définition

Tout rayonnement - particule ou photon - dont énergie > énergie de liaison des électrons les moins liés des atomes constituant la matière vivante - C , H , O , N:

$E_{RI} \geq 12{,}4$ eV

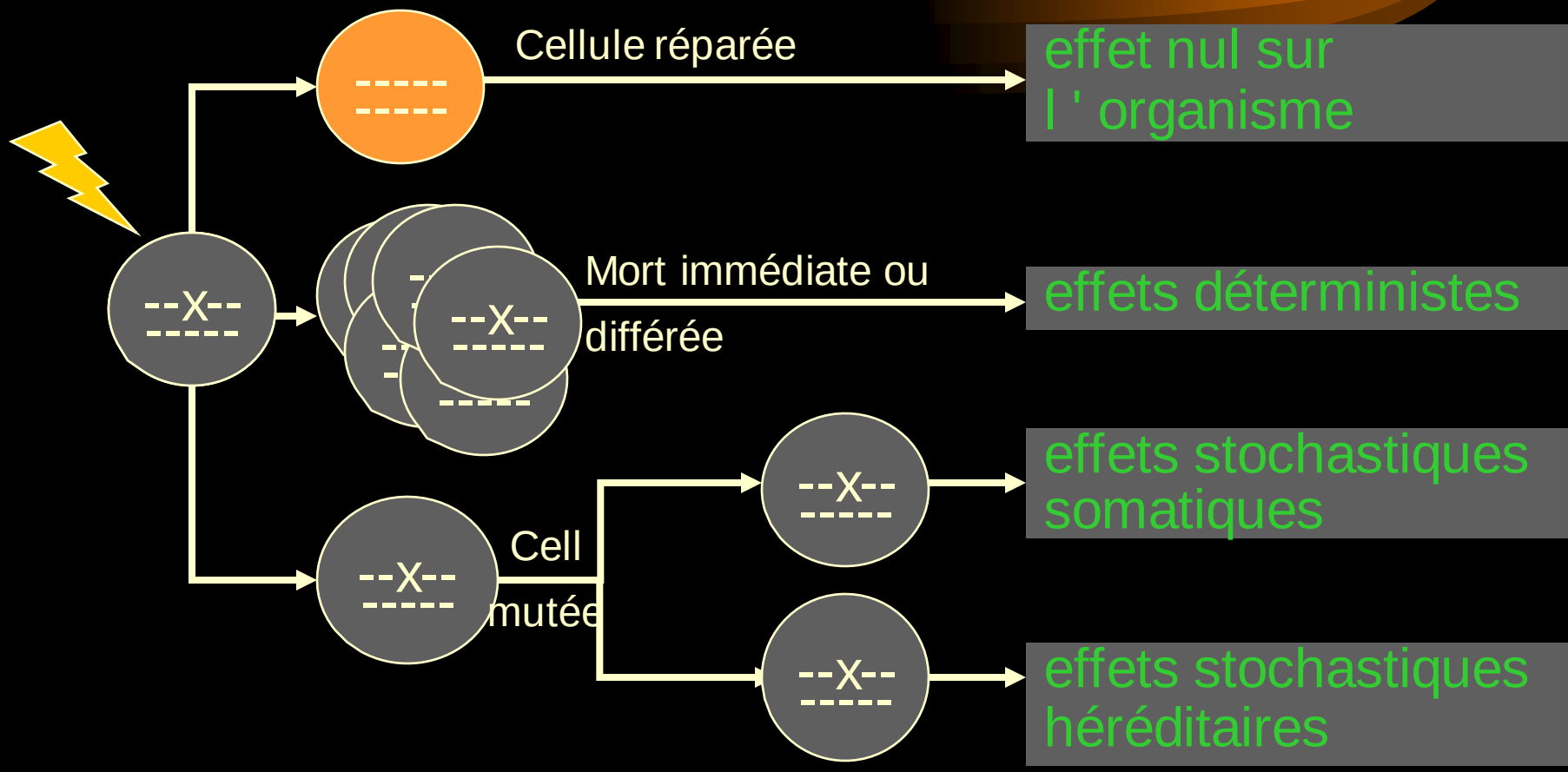
liaison H–H dans molécule H_2 : 4,52 eV
liaison C–H dans les alcanes : 4,18 eV
liaison O=O : 5,08 eV
liaison N≡N : 9,76 eV

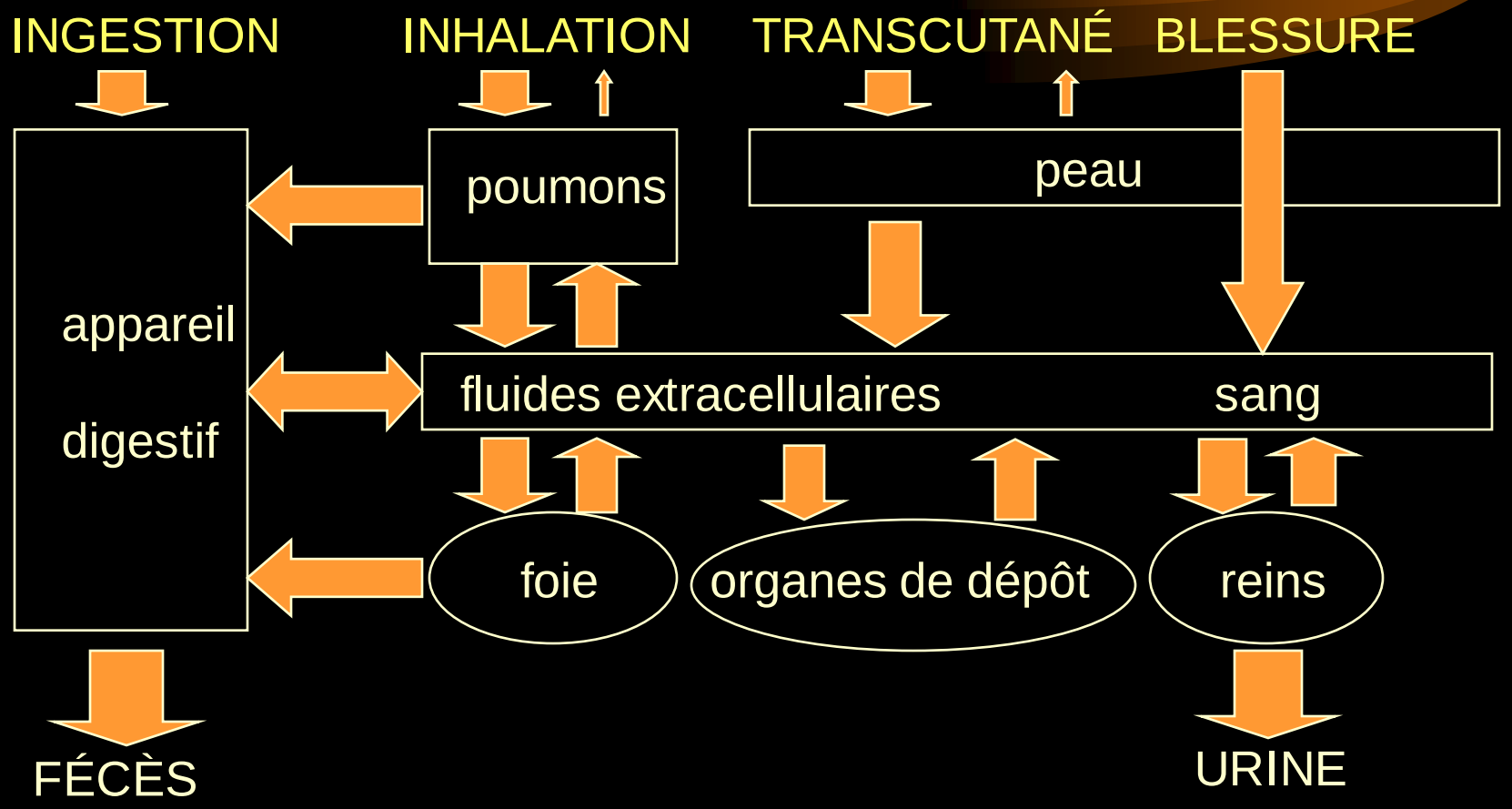
RI utilisés pour le traitement des tumeurs



Rayonnements ionisants

effets biologiques



Radioprotection

incorporation et parcours d 'un radionucléide